XIII Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica



TAEE 2018 TENERIFE

Libro de actas

Universidad de La Laguna
Tenerife
20 - 22 de Junio

T A E E 2 0 1 8

XII Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica

LIBRO DE ACTAS

Tenerife, 20-22 de junio, 2018
Universidad de La Laguna

Título:
Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica

Subtítulo:
Actas del XIII Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica, Tenerife, 20-22 de junio, 2018

Reservados todos los derechos. No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio sin el permiso previo por escrito del titular del copyright.

© XIII Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica, TAEE 2018 - Tenerife
ISBN-13: 978-84-09-03113-9

Editores:
Manuel Rodríguez Valido
María de la Peña Fabiani
Alejandro José Ayala Alfonso
José Ignacio Estévez Damas
Carina Soledad González González
Oswaldo Bernabé González Hernández
Virginia Gutiérrez Rodríguez
Eduardo Magdaleno Castelló
Fernando Andrés Pérez Navas
Beatriz Rodríguez Mendoza
Silvestre Rodríguez Pérez
Isabel Sánchez Berriel
Néstor Albelo Jorge

ÍNDICE GENERAL

CONGRESO TAEE 2018:

PRESENTACIÓN 9

Carta de la Asociación TAEE 9

Bienvenida del Coordinador TAEE 2018 11

COMITÉS 13

Junta Directiva de la Asociación TAEE 13

Comité Local 13

Comité Científico 13

REVISORES 15

INSTITUCIONES Y EMPRESAS 17

CUADRO DEL PROGRAMA DEL CONGRESO 19

ÍNDICE DE ACTAS 21

ACTAS 25

Sesión I.A: Sistemas de Comunicación / Procesado de Señal 1 25

Sesión I.B: Electrónica Analógica 1 49

Sesión II.A: Sistemas de Comunicación / Procesado de Señal 2 91

Sesión II.B: Electrónica Analógica 2 119

Sesión II.C: Fundamentos de Electrónica / Electrónica de Potencia 159

Sesión III.A: Automática y Robótica 1 195

Sesión III.B: Sistemas Digitales 1 245

Sesión III.C: Instrumentación Electrónica 1 281

Sesión IV.A: Automática y Robótica 2 323

Sesión IV.B: Instrumentación Electrónica 2 361

Sesión V.A: Sistemas Digitales 2 397

Sesión V.B: Innovación Educativa 425

Pósteres 463

Demostradores 585

ÍNDICE DE AUTORES 631



CARTA DE LA ASOCIACIÓN TAEE

Hace veintidós años del primer congreso TAEE, en el que profesores del área de la Electrónica y afines procedentes de toda la geografía española, alguna portuguesa e incluso hispanoamericana, nos reunimos cada dos años para tratar de temas relacionados con el área, compartiendo preocupaciones, recursos y soluciones para nuestra actividad docente.

Inicialmente TAEE surgió con los objetivos de enriquecer las metodologías de enseñanza mediante la aplicación de nuevos recursos tecnológicos, compartir nuevas prácticas, trabajar colaborativamente, fomentar la reutilización de recursos didácticos elaborados por los propios profesores y analizar como colectivo los nuevos retos y necesidades formativas en Electrónica, en una sociedad basada en el conocimiento. Después de tantos años, al comienzo de esta decimotercera edición, estos objetivos permanecen más vivos que nunca cuando estamos en la segunda década del siglo XXI, donde nos envuelve la tecnología que impregna nuestra sociedad, sociedad del conocimiento que está permitiendo establecer nuevos paradigmas en la docencia universitaria.

Un congreso que a pesar de las dificultades aparecidas en estos últimos años como consecuencia de una gran crisis económica, que ha repercutido en el funcionamiento ordinario de muchas de nuestras universidades, sigue aglutinando a muchos compañeros/as, que con el mismo interés que el primer día, tratan de aprender e intercambiar ideas sobre la manera de enseñar, que al fin y al cabo es de lo que se trata. En estos años han sido numerosas las ciudades que nos han acogido con cariño, Bilbao, Vigo, Zaragoza, Valencia, Las Palmas, Barcelona, Madrid, Sevilla, y por último San Cristóbal de la Laguna donde nos encontramos.

En la actualidad la asociación TAEE "Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica", motor de este congreso, está formada por profesores que imparten docencia en el campo de la Electrónica y constituye un lugar de encuentro de profesores de España, Portugal y América Latina. A los nuevos profesores que os incorporáis, os damos la bienvenida y os invitamos formar parte de esta gran comunidad, como asociados. Y por último agradecer a todos los miembros del Comité Local de la Universidad de la Laguna, su trabajo y esfuerzo diario para que hoy podamos estar reunidos y este congreso sea todo un éxito.

Juan Domingo Aguilar Peña
Presidente TAEE

BIENVENIDA DEL COORDINADOR TAEE 2018

Del 20 al 22 de junio se celebrará, en la Ciudad de La Laguna, la XIII edición del congreso en Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (TAEE 2018). TAEE es el lugar de encuentro de profesores de universidades españolas, portuguesas y latinoamericanas, para compartir experiencias docentes y presentar los resultados sobre innovación educativa en áreas de tecnologías electrónicas, de información y de comunicaciones.

Tras la magnífica experiencia de la edición anterior del congreso TAEE, celebrada en 2016 en Sevilla, este año corresponde a la Universidad de La Laguna el honor y la responsabilidad de organizar dicho evento. Para ello, además del soporte institucional, contamos con el apoyo de la Asociación TAEE y del IEEE.

En este mensaje de bienvenida no podemos dejar de mencionar a nuestra ciudad, La Laguna. Dado que La Laguna fue la primera capital de Tenerife, concentra un rico patrimonio histórico en un espacio geográfico muy reducido. Nuestra ciudad, cuyo casco histórico fue el modelo que utilizaron después los colonizadores del Nuevo Mundo en la creación de muchas ciudades americanas, forma parte del catálogo de ciudades Patrimonio de la Humanidad de la UNESCO. Pero, sobre todo, es una ciudad acogedora que recibe a sus visitantes con los brazos abiertos.

Queremos expresar nuestro máximo agradecimiento a todos los que han hecho posible TAEE 2018: autores, revisores, moderadores de sesiones, conferencias y mesa redonda, asistentes y colaboradores institucionales y privados, así como a la asociación TAEE por apostar por nosotros. También agradecer por su apoyo, en todo momento, a la Universidad de la Laguna, a la "Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología" y a los Departamentos de "Ingeniería Industrial" y de "Ingeniería Informática y de Sistemas".

Finalmente, junto con nuestra esperanza en que el congreso cumpla su finalidad, les deseamos que los días que compartiremos durante su celebración sean de un grato compañerismo, de disfrute de la relación personal entre nosotros y de descubrimiento de esta bella ciudad de La Laguna.

La Laguna, 20 de junio de 2018

Manuel Rodríguez Valido
Universidad de La Laguna

COMITÉS

Junta Directiva de la Asociación TAEE

- Presidente: Juan Domingo Aguilar Peña – Universidad de Jaén
- Vicepresidente: Asunción Morales Santana- Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
- Secretario: Catalina Rus Casas – Universidad de Jaén
- Tesorero: Camilo Quintáns Graña – Universidad de Vigo
- Vocal: Jorge Juan Chico – Universidad de Sevilla
- Vocal: Sergio López Gregorio – Universidad Politécnica de Madrid
- Coordinador otras asociaciones: Manuel Alonso Castro Gil – Universidad Nacional de Educación a Distancia

Comité Local

- Coordinador: Manuel Rodríguez Valido – Universidad de La Laguna
- Secretaria: María de la Peña Fabiani – Universidad de La Laguna
- Alejandro José Ayala Alfonso – Universidad de La Laguna
- José Ignacio Estévez Damas – Universidad de La Laguna
- Carina Soledad González González – Universidad de La Laguna
- Oswaldo Bernabé González Hernández – Universidad de La Laguna
- Virginia Gutiérrez Rodríguez – Universidad de La Laguna
- Eduardo Magdaleno Castelló – Universidad de La Laguna
- Fernando Andrés Pérez Navas – Universidad de La Laguna
- Beatriz Rodríguez Mendoza – Universidad de La Laguna
- Silvestre Rodríguez Pérez – Universidad de La Laguna
- Isabel Sánchez Berriel – Universidad de La Laguna
- Néstor Albelo Jorge – Universidad de La Laguna

Comité Científico

- Juan Domingo Aguilar Peña – Universidad de Jaén
- Jesús Arriaga García de Andoaín – Universidad Politécnica de Madrid
- Francisco Javier Azcondo Sánchez – Universidad de Cantabria
- Raymundo Barrales Guadarrama – Universidad Autónoma Metropolitana
- Federico José Barrero García – Universidad de Sevilla
- David Benito Pertusa – Universidad Pública de Navarra
- Juarez Bento da Silva – Universidad Federal de Santa Catarina
- Ramón Bragós Bardia – Universidad Politécnica de Cataluña
- Roberto Capilla Lladró – Universidad Politécnica de Valencia
- Pedro Antonio Carrión Pérez – Universidad de Castilla La Mancha
- Gonzalo Casaravilla – Universidad de la República
- Manuel Alonso Castro Gil – Universidad Nacional de Educación a Distancia
- Cesar Collazos – Universidad de Cauca Popayán
- José Ignacio Estévez Damas – Universidad de La Laguna
- Peña Fabiani Bendicho – Universidad de La Laguna
- Javier García Zubía – Universidad de Deusto
- Oswaldo González Hernández – Universidad de La Laguna
- Jorge Juan Chico – Universidad de Sevilla
- Alfonso Lago Ferreiro – Universidad de Vigo
- Martín Llamas Nistal – Universidad de Vigo
- Eduardo Magdaleno Castello – Universidad de La Laguna
- Enrique Mandado Pérez – Universidad de Vigo
- Bonifacio Martín del Brío – Universidad de Zaragoza
- Manuel Martins Barata – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
- Mª Asunción Morales Santana – Universidad de Las Palmas
- Emilio Olías Ruiz – Universidad Carlos III

- José Miguel Páez Jiménez – Universidad de Costa Rica
- Julio Pérez Acle – Universidad de la República
- Fernando Pescador del Oso – Universidad Politécnica de Madrid
- Inmaculada Plaza García – Universidad de Zaragoza
- Camilo Quintáns Graña – Universidad de Vigo
- Gustavo Ribeiro da Costa Alves – Instituto Superior de Engenharia de Oporto
- Silvestre Rodríguez Pérez – Universidad de La Laguna
- Manuel Rodríguez Valido – Universidad de La Laguna
- José Miguel Ruiz González – Universidad de Valladolid
- Catalina Rus Casas – Universidad de Jaén
- César Sanz Álvaro – Universidad Politécnica de Madrid
- Edmundo Tovar Caro – Universidad Politécnica de Madrid

REVISORES

Antonio Acosta	Universidad de Sevilla, Spain.
Juan Domingo Aguilar	Universidad de Jaén, Spain.
Raúl Alcaraz Martínez	Universidad de Castilla-La Mancha, Spain.
Gustavo Alves	Instituto Politécnico do Porto, Portugal.
Ana Arboleya Arboleya	Universidad de Oviedo, Spain.
Francisco Arcega	Universidad de Zaragoza, Spain.
Jesús Sergio Artal Sevil	Universidad de Zaragoza, Spain.
José I. Artigas	Universidad de Zaragoza, Spain.
María José Avedillo	Universidad de Sevilla, Spain.
Alejandro Ayala Alfonso	Universidad de La Laguna, Spain.
Eduardo Aznar	Universidad de Zaragoza, Spain.
Ana M. Barbancho	Universidad de Málaga, Spain.
Antonio Barbancho	Universidad de Sevilla, Spain.
Ángel Barriga	Universidad de Sevilla, Spain.
Andoni Beriain-Rodríguez	Universidad de Navarra, Spain.
Manuel Blázquez	IES Ramiro de Maeztu, Spain.
Ramón Bragos	Universitat Politècnica de Catalunya, Spain.
María Brox	Universidad de Córdoba, Spain.
Manuel Caeiro Rodríguez	Universidad de Vigo, Spain.
Agustín Caminero	Universidad Nacional de Educación a Distancia, Spain.
Roberto Capilla	Universitat Politècnica de València, Spain.
Cesar A. Collazos	Universidad del Cauca, Colombia.
Gabriel Díaz Orueta	Universidad Nacional de Educación a Distancia, Spain.
Manuel Domínguez	Universidad de León, Spain.
Luis Dávila	Universidad Politécnica de Madrid, Spain.
José Ignacio Estévez Damas	Universidad de La Laguna, Spain.
Manuel Felgueiras	Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal.
Raúl Fernández	Universitat Politècnica de Catalunya, Spain.
Félix J. García Clemente	Universidad de Murcia, Spain.
Andrés Gersnoviez	Universidad de Córdoba, Spain.
Luis Gil	Universitat Politècnica de València, Spain.
Marisa Gil	Universitat Politècnica de Catalunya, Spain.
Guillermo Glez-De-Rivera	Universidad Autónoma de Madrid, Spain.
Luis Gómez Déniz	Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Spain.
Francisco Javier González-Cañete	Universidad de Málaga, Spain.
Oswaldo González	Universidad de La Laguna, Spain.
Roberto Haarth	Universidad Nacional de Cuyo, Argentina.
Carlos Jiménez	Universidad de Sevilla, Spain.
Jaime Jiménez	Euskal Herriko Unibertsitatea, Spain.
Gabino Jiménez Castillo	Universidad de Jaén, Spain.
Alfonso Lago	Universidad de Vigo, Spain.
Fernando Las-Heras	Universidad de Oviedo Spain.
Martin Llamas Nistal	Universidad de Vigo Spain.
Sergio López Gregorio	Universidad Politécnica de Madrid, Spain.
Antonio López-Martín	Universidad Pública de Navarra, Spain.
José María López-Valles	Universidad de Castilla-La Mancha, Spain.
Eduardo Magdaleno Castelló	Universidad de La Laguna, Spain.
Jorge Marcos Acevedo	Universidad de Vigo, Spain.
Sergio Martin	Universidad Nacional de Educación a Distancia, Spain.
Bonifacio Martin Del Brio	Universidad de Zaragoza, Spain.
Manuel Martins Barata	Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal.
Antonio Martí	Universitat Politècnica de València, Spain.
Rafael Masot	Universitat Politècnica de València, Spain.
Carlos Medrano	Universidad de Zaragoza, Spain.
Jaizki Mendizabal	Universidad de Navarra, Spain
Héctor Migallón	Universidad Miguel Hernández de Elche, Spain.
Mª Asunción Morales	Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Spain.
Rafael Navas-González	Universidad de Málaga, Spain.

Luis M. Nieto	Universidad de Jaén, Spain.
Andrés Nogueiras Meléndez	Universidad de Vigo, Spain.
Emilio Olias	Universidad Carlos III de Madrid, Spain.
Joan Oliver	Universitat Autònoma de Barcelona, Spain.
Juan Oliver	Universidad de la República, Uruguay.
Julio Pastor Mendoza	Universidad de Alcalá, Spain.
Rafael Pastor Vargas	Universidad Nacional de Educación a Distancia, Spain.
Manuel Perales	Universidad de Sevilla, Spain.
Pedro Pérez	University of Jaen Spain
Julio Pérez Acle	Universidad de la República, Uruguay.
Jesús Alfonso Pérez Gama	San José Fundación de Educación Superior, Colombia.
Clovis Antonio Petry	Universidade Federal de Santa Catarina, Brazil.
Inmaculada Plaza	Universidad de Zaragoza, Spain.
Luis Héctor Porragas Beltrán	Universidad Veracruzana, Mexico.
Marc Porti	Universitat Autònoma de Barcelona, Spain.
Miguel Ángel Prada Medrano	Universidad de León, Spain.
Marta Prim	Universitat Autònoma de Barcelona, Spain.
José Miguel Páez	Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
Noemí Pérez Hernández	Universidad de Navarra, Spain.
Camilo Quintáns Graña	Universidad de Vigo, Spain.
Antonio Robles-Gómez	Universidad Nacional de Educación a Distancia, Spain.
Javier Roca-Piera	Universidad de Almería, Spain.
Carlos Roche	Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.
Manuel Rodríguez	Universidad de La Laguna, Spain.
Silvestre Rodríguez Pérez	Universidad de La Laguna, Spain.
Víctor José Rodríguez Martín	IES La Vaguada, Spain.
Beatriz Rodríguez Mendoza	Universidad de La Laguna, Spain.
Susana Romero	Universidad de Deusto, Spain.
Miguel Romá	Universidad de Alicante, Spain.
Jonathan Ruiz-De-Garibay	Universidad de Deusto, Spain.
Catalina Rus-Casas	Universidad de Jaén, Spain.
Rubén Salvador	Universidad Politécnica de Madrid, Spain.
José Ángel Sánchez Ortiz	Universidad Nacional de Educación a Distancia, Spain.
Carlos Sánchez-Azqueta	Universidad de Zaragoza, Spain.
Juan M. Santos	Universidad de Vigo, Spain.
Juarez Bento Silva	Universidade Federal de Santa Catarina, Brazil.
Héctor Solar	Universidad de Navarra, Spain.
Juan Carlos Soto Merino	Euskal Herriko Unibertsitatea, Spain.
Félix Tobajas	Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Spain.
Llanos Tobarra	Universidad Nacional de Educación a Distancia, Spain.
F. David Trujillo	Universidad de Málaga, Spain.
Isidro Urriza	Universidad de Zaragoza, Spain.
Inaki Vázquez	Universidad de Deusto, Spain.
Aurelio Vega-Martínez	Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Spain.
Julián Viejo Cortés	Universidad de Sevilla, Spain.
Ramon Vilanova	Universitat Autònoma de Barcelona, Spain.
Anna Vilà	Universitat de Barcelona, Spain.
Luis Zorzano	Universidad de La Rioja, Spain.

INSTITUCIONES Y EMPRESAS























CUADRO DEL PROGRAMA DEL CONGRESO

<table>
<tr><th>Hora</th><th>MIÉRCOLES 20</th><th>JUEVES 21</th><th>VIERNES 22</th></tr>
<tr><td>8:30-9:00</td><td>Registro</td><td>Registro</td><td>Registro</td></tr>
<tr><td>9:00-9:30</td><td>Inauguración</td><td rowspan="2">Sesiones paralelas II:
II.A. II.B y II.C</td><td rowspan="2">Sesiones paralelas IV:
IV.A y IV.B</td></tr>
<tr><td>9:30-10:30</td><td>Conferencia invitada 1</td></tr>
<tr><td>10:30-11:00</td><td>Café</td><td>Café</td><td>Café</td></tr>
<tr><td>11:00-12:30</td><td>Sesiones paralelas I:
I.A y I.B</td><td>Conferencia Invitada 2
(1 hora)</td><td>Sesiones paralelas V:
V.A y V.B</td></tr>
<tr><td rowspan="2">12:30-14:00</td><td rowspan="2">Pósteres y
Demostradores I</td><td rowspan="2">Sesiones paralelas III:
III.A, III.B y III.C</td><td>Reunión IEEE
(12:30-13:30)</td></tr>
<tr><td>Clausura TAEE
(13:30-14:00)</td></tr>
<tr><td>14:00-15:00</td><td>Almuerzo de trabajo</td><td>Almuerzo de trabajo</td><td>Almuerzo de trabajo</td></tr>
<tr><td>15:00-16:30</td><td>Pósteres y
Demostradores II</td><td></td><td rowspan="6"></td></tr>
<tr><td>16:30-17:00</td><td>Café</td><td rowspan="4">Visita guiada al
Parque Nacional del
Teide y
Puerto de la Cruz</td></tr>
<tr><td>17:00-18:00</td><td>Mesa redonda</td></tr>
<tr><td>18:00-19:00</td><td>Asamblea TAEE</td></tr>
<tr><td>19:30</td><td>Visita guiada por
San Cristóbal de La
Laguna</td></tr>
<tr><td>20:30</td><td>Recepción en
La Laguna Gran
Hotel****</td><td>Cena de gala en el
Centro de celebraciones
Buen Paso La Gañanía</td></tr>
</table>

Conferencia Invitada 1

"EL LABORATORIO PEDAGÓGICO OLIN COLLEGE: INSPIRACIÓN Y MOTIVACIÓN PARA LA INNOVACIÓN"
Sr. Dr. D. Jose Oscar Mur Miranda, becario visitante, Laspau, afiliado con Harvard University

Conferencia Invitada 2

"DIEZ COSAS QUE QUIERO DECIR SOBRE EVALUACIÓN"
Sr. Dr. D. Miguel Valero García, Catedrático de Universidad del Departamento de Arquitectura de Computadores de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Sesiones Paralelas I

Sesión I.A: Sistemas de Comunicación / Procesado de Señal 1
Sesión I.B: Electrónica Analógica 1

Sesiones Paralelas II

Sesión II.A: Sistemas de Comunicación / Procesado de Señal 2
Sesión II.B: Electrónica Analógica 2
Sesión II.C: Fundamentos de Electrónica / Electrónica de Potencia

Sesiones Paralelas III

Sesión III.A: Automática y Robótica 1
Sesión III.B: Sistemas Digitales 1
Sesión III.C: Instrumentación Electrónica 1

Sesiones Paralelas IV

Sesión IV.A: Automática y Robótica 2
Sesión IV.B: Instrumentación Electrónica 2

Sesiones Paralelas V

Sesión V.A: Sistemas Digitales 2
Sesión V.B: Innovación Educativa

ÍNDICE DE ACTAS

Sesiones Paralelas I

Sesión I.A: Sistemas de Comunicación/Procesado de Señal 1

Project Based Learning methodology applied to Radiofrequency subject 27
Héctor Solar Ruiz, Andoni Berian, David Del Río and Roc Berenguer

Estudio del impacto de actualización tecnológica en docencia de Grado y Máster de Ingeniería ... 33
Ana Alejos, Francisco Falcone y Leyre Azpilicueta

Educational platform for communications using the MQTT protocol 37
David Matabuena, Antonio Moreno-Muñoz, Francisco J. Bellido-Outeiriño, José M. Flores-Arias and Aurora Gil-de-Castro

Análisis de resultados de los estudiantes en base a datos de conexión al LMS Estudio de caso: máster online basado en tareas 43
Antonio Menacho, Manuel Castro Gil, Clara Pérez, Pedro Plaza Merino, José M. Benítez y Elio San Cristóbal Ruiz

Sesión I.B: Electrónica Analógica 1

An electroacoustical testbench: Characterizing an audio line 51
Pablo Garrido Sánchez and Andrés Roldán Aranda

A reconfigurable and expandable kit to teach electronic circuits based on Operational Amplifiers.... 56
Ricardo Costa, Paulo Portela, Gustavo Alves, Manuel Carlos Felgueiras and Clara Viegas

Transistor teaching back to Transfer-Resistor: A summary table of definitions and students' perceptions 66
Manuel Carlos Felgueiras, Ricardo Costa, Andre Fidalgo and Gustavo Alves

Análisis de diferentes técnicas de modulación PWM: Comparación y diseño 73
Jesús Sergio Artal Sevil, Rodolfo Dufo López y José L. Bernal Agustín

Análisis de pérdidas de potencia en un inversor trifásico 3L-NPC. Comparación con diferentes técnicas de modulación PWM 81
Jesús Sergio Artal Sevil, Juan M. Lujano Rojas, Carlos Bernal Ruiz e Iván Sanz Gorrachategui

Sesiones Paralelas II

Sesión II.A: Sistemas de Comunicación / Procesado de Señal 2

Software based AFSK generation on Arduino 93
Luis Sánchez Velasco and Andrés Roldán Aranda

A technique for computing the convolution of exponential signals and its application in systems theory 98
Francisco Das Chagas Mota and Tania Luna

SDR: From theory to real world communication 104
Víctor González Barbone, Federico Larroca and Pablo Belzarena García

A RFID-based IoT cybersecurity lab in Telecommunications Engineering 111
Santiago Figueroa Lorenzo, Javier Añorga Benito, Josune Hernantes Apezetxea, Juan Francisco Carias and Saioa Arrizabalaga Juaristi

Sesión II.B: Electrónica Analógica 2

Uso del Internet de las Cosas como estrategia de aprendizaje en asignaturas de Electrónica 121
Manuel Ángel Perales Esteve, Federico J. Barrero García y Sergio Toral Marín

Aprendizaje Basado en Problemas como metodología docente en una asignatura de Electrónica Básica en un Máster Universitario de Ingeniería Industrial 126
Federico J. Barrero García, Manuel Ángel Perales Esteve y Sergio Toral Marín

PILAR: Plataforma de federación de laboratorios remotos VISIR de Electrónica Analógica 131
Javier García Zubia, Unai Hernández Jayo, Manuel Castro Gil, Félix García Loro, Elio San Cristóbal Ruiz, Gabriel Díaz Orueta, Alejandro Macho, Gustavo Alves, André Fidalgo, Arcelina Marques, Andreas Pester, Christian Kreiter, Doru Ursutiu, Carla García y Kati Valtonen

Resultados de la implantación de la metodología PBL en la asignatura de grado Electrónica General 137
Manuel Fuentes Conde y Marta Vivar García

Ejemplo de éxito en la implantación de una metodología PBL: de asignatura de Grado a TFG ... 144
Manuel Fuentes Conde y Marta Vivar García

Docencia por iguales y su efecto en la motivación aplicado a la docencia en Electrónica 152
Peña Fabiani Bendicho, Sara González Pérez y Carlos Efrén Mora Luis

Sesión II.C: Fundamentos de Electrónica / Electrónica de Potencia

Adaptación de un banco de ensayos de un motor de ignición por compresión mediante Trabajos Fin de Grado y Proyectos Fin de Carrera 161
Raquel Fernández Ramos, Francisco Javier Martos Ramos, José Antonio Hidalgo López, Francisco Javier Ríos Gómez, José Francisco Martín Canales, Manuel Jesús Martín Vázquez y Jorge Romero Sánchez

Placas de convertidores DC-DC de bajo coste aplicadas a la docencia de Sistemas Electrónicos .. 167
Juan Domingo Aguilar Peña, Juan Ignacio Fernández Carrasco y Daniel Cintas Cintas

An approach to Inclusive Education in Electronic Engineering through Serious Games 176
Ángel Jaramillo Alcázar, Carlos Guaita, Jorge Luis Rosero Beltrán and Sergio Luján Mora

MasterEngineer: A Game-based technique in Power Electronics and Drives Teaching 183
Mario Durán, Ignacio González Prieto, Paula García Entrambasaguas, Juan José Aciego, Ángel González and Natalia Ríos

Aplicación móvil EnjoyCircuits para Fundamentos de Ingeniería Eléctrica 189
Mario Durán, Ángela Fernández, Ignacio González Prieto, Ángel González, Álvaro Durán y Luis Parras

Sesiones Paralelas III

Sesión III.A: Automática y Robótica 1

Crumble como herramienta educativa para introducir en robótica 197
Pedro Plaza Merino, Elio San Cristóbal Ruiz, Germán Carro, Manuel Castro Gil, Manuel Blázquez, Félix García Loro y Javier Muñoz

Aprendizaje mediante prácticas coordinadas en asignaturas de Grado de Ingeniería 205
Alberto Daza Márquez, Raquel Fernández Ramos y Rafael Navas González

Experiencias de estudiantes y profesores en la realización de Trabajos Fin de Grado multidisciplinares 214
Julio Pastor Mendoza, Emiliano Pereira González, Miguel Tradacete Ágreda, Gonzalo Rodríguez Martín, Rodrigo Gutiérrez Moreno, Mario Ríos Muñoz y Sofía Barba Magdalena

Aprendizaje Basado en Problemas Orientado a Proyectos para la adquisición de competencias en vinculadas a los controladores industriales 223
Carlos Efrén Mora Luis, Javier Machado Toledo, Jorge Martín Gutiérrez, Peña Fabiani Bendicho y Sara González Pérez

Project Based Learning on Industrial Informatics: Applying IoT to urban garden 230
Francisco Javier Hormigo Aguilar and Andrés Rodríguez

A hands-on course for introducing freshmen for Electrical Engineering 239
Álvaro Giusto

Sesión III.B: Sistemas Digitales 1

Generación de cronogramas a medida en Sistemas Digitales 247
Javier Roca Piera y Toni Schaarschmidt

Definición de máquinas de estados, eventos y acciones en pequeños procesadores 254
Aitzol Zuloaga Izaguirre, Jaime Jiménez Verde, Jesús Lázaro, Carlos Cuadrado y Unai Bidarte

Las máquinas de tiempo como base del procesamiento en tiempo real con pequeños procesadores .. 262
Aitzol Zuloaga Izaguirre, Jaime Jiménez Verde, Jesús Lázaro, Carlos Cuadrado y Unai Bidarte

La motivación en el aprendizaje de la Electrónica como mejora de la calidad de la educación 270
Paulino Ruiz de Clavijo Vázquez, Jorge Juan Chico, Francisco Sivianes, Mariló Hernández y Pedro Fortet

Planificación docente de una asignatura de Dispositivos Electrónicos Avanzados orientada a los Objetivos de Aprendizaje EUR-ACE 275
Daniel Gutiérrez Reina, Manuel Ángel Perales Esteve y Sergio Toral Marín

Sesión III.C: Instrumentación Electrónica 1

The VISIR implementation process at IFSC - problems, obstacles and solutions 283
Luis C. M. Schlichting, Daniel Bona, Golberi Ferreira and Gustavo Alves

Incorporación de VISIR en Ingeniería Electrónica. Una experiencia institucional en Argentina . 289
Susana Marchisio, Daniel Crepaldo, Franco del Colle, Federico Lerro, Sonia Concari, Daniel León, Claudio Merendino, Luciano Rumin, Javier Ghorghor, Miguel Plano, Héctor Coscia, Unai Hernández Jayo, Javier García Zubia y Gustavo Alves

Experiencia didáctica en la escuela secundaria con el laboratorio remoto VISIR 299
Manuel Blázquez, Alejandro Macho Aroca, Pablo Baizán Álvarez, Félix García Loro, Elio San Cristóbal Ruiz, Gabriel Díez Orueta, Manuel Castro Gil y Pedro Plaza Merino

Experiencia en la construcción de un entorno personal de aprendizaje para la asignatura sistemas de adquisición de datos 309
Catalina Rus Casas, Juan Domingo Aguilar Peña, Gabino Jiménez Castillo, María de los Ángeles Peña Hita y Francisco José Muñoz Rodríguez

Implementation of an Educational Platform on Power Quality 317
Aurora Gil de Castro, Isabel Moreno García, Victor Pallarés López, David Matabuena, Ricardo Medina Gracia and Antonio Moreno Muñoz

Sesiones Paralelas IV

Sesión IV.A: Automática y Robótica 2

Implementación de una línea electiva en Automatización Avanzada para Ingeniería Electrónica 325
Alexander Cortés Llanos, Víctor Hugo Bernal Tristancho y Luis Fernando Rico Riveros
Diseño e implementación de guías de laboratorio de un sistema de prueba y medición para el desarrollo de aplicaciones telemétricas 332
Luis Fernando Rico Riveros, Víctor Hugo Bernal Tristancho y Alexander Cortés Llanos
Sistema de adquisición de datos y control industrial basado en Arduino Due con hardware y software libre 340
Gustavo Ernesto Real, María Florencia Jauré y Amado Osvaldo Vitali
Plataforma robótica para aprendizaje activo multidisciplinar 348
Álvaro Rodríguez, Fabio Gómez Estern y Daniel Gutiérrez Reina
Stirring up the learning to program robotic arms through the generation of student handwriting ... 355
José Juan Quintana Hernández, Moisés Díaz Cabrera and Miguel Ángel Ferrer Ballester

Sesión IV.B: Instrumentación Electrónica 2

Coordinación e integración de prácticas en asignaturas de Grado en Ingeniería: Electrónica Digital y Sistemas Electrónicos..... 363
Rafael Navas González, Alberto Daza Márquez, Raquel Fernández Ramos y Óscar Oballe Peinado
Curso de Instrumentación Biomédica en Ingeniería de la Salud 370
Rafael Navas González
Desarrollo de un electrocardiógrafo portátil..... 380
Antonio García Manso, Jorge Antonio Flores Román, Carlos J. García Orellana, Horacio M. González Velasco, Miguel Macías Macías y Ramón Gallardo Caballero
ECG study in practical labs for biomedical engineering training..... 387
Pablo Pérez García, Alberto Olmo and Alberto Yúfera
Evaluación de incertidumbres de medida en las curvas de calibración de los sensores de medida 391
Camilo Quintáns Graña, Ramiro Iglesias Suárez-Pumariega y Jorge Marcos Aceved

Sesiones Paralelas V

Sesión V.A: Sistemas Digitales 2

SICOME 2.0: A teaching simulator for Computer Architecture 399
María Brox Jiménez, Andrés A. Gersnoviez Milla, Miguel Ángel Montijano Vizcaíno, Ezequiel Herruzo Gómez and Carlos Diego Moreno Moreno
UCOMIPSIM 2.0: Pipelined MIPS Architecture Simulator 406
Andrés A. Gersnoviez Milla, María Brox Jiménez, Miguel Ángel Montijano Vizcaíno, Juan A. Sújar Rodríguez and Carlos Diego Moreno Moreno
Evaluación Basada en Proyectos en una asignatura troncal de Sistemas Electrónicos..... 412
Manuel Ángel Perales Esteve, Federico J. Barrero García, Sergio Toral, Fernando Muñoz y Enrique López
Aprendizaje Basado en Proyectos en una asignatura de Electrónica Industrial 418
Cristina Martín, Ignacio González Prieto, Manuel Ángel Perales Esteve, Antonio Ruiz, Fabio Gañán y Federico J. Barrero García

Sesión V.B: Innovación Educativa

Salvar al soldado Teleco..... 427
Jaime Jiménez Verde, Aitzol Zuloaga Izaguirre, Jesús Lázaro, Carlos Cuadrado y Unai Bidarte
Proyecto Express: Creación de grupos interdisciplinares cohesionados a través de un proyecto parte de asignaturas de distintos grados 430
Roberto Casas Nebra, José María López Pérez, Carlos Romero Piqueras, Teresa Blanco Bascuas y Eduardo Manchado Pérez
Common Understanding Area (CUA): Una herramienta de aprendizaje transdisciplinar para la innovación tecnológica 438
Teresa Blanco Bascuas, Roberto Casas Nebra y José María López Pérez
Challenge based education: an approach to innovation through multidisciplinary teams of students using Design Thinking 446
Guido Charosky, Lotta Hassi, Luciana Leveratto, Juan José Ramos, Kyriaki Papageorgiou and Ramón Bragós
Uso de Métodos Ágiles y Lean en la realización de Proyectos en Tecnología Electrónica..... 454
Manuel Caeiro Rodríguez

Pósteres

SDSoC como herramienta de codiseño HW/SW para Trabajos Fin de Grado en Informática 465
Eduardo Magdaleno Castelló, Manuel J. Rodríguez Valido, Fernando Pérez y Cristhian García
Low cost magnetic simulator for 1U cubesat attitude control 472
Mario Castro Santiago, Andrés Roldán Aranda and Luis Sánchez Velasco
Low cost TVAC Chamber for aerospace tests 479
Juan Manuel López Torralba and Andrés Roldán Aranda
Low-cost laser cutter and PCB exposure 484
José Carlos Martínez Durillo, Pilar Moreu Falcón and Andrés Roldán Aranda
Teaching opportunities in measurements of magnetic field 494
David Aguilera Jiménez, Andrés Roldán Aranda and Pablo Garrido Sánchez
Monitorización de un sistema de bombeo solar aislado a través de IoT 500
Carlos J. García Orellana, Alejandro Asensio Nieto, Miguel Macías Macías, Antonio García Manso, Horacio M. González Velasco y Ramón Gallardo Caballero
e-Kart: Trabajo colaborativo I+D+m basado en la metodología de proyectos 508
Ricardo Miguel González Rodríguez y Jesús Artemio González Vega
Aportaciones al diseño y construcción de trazadores de curvas características de dispositivos fotovoltaicos 512
Eduardo F. Fernández, Andrés Firman, Jesús Montes Romero, Manuel Cáceres, Luis H. Vera y Juan de la Casa Higueras
La enseñanza de Electrónica en los dos primeros cursos de los Grados de Telecomunicación: Comparativa con universidades españolas y extranjeras 520
Ana De Andrés, María Soledad Escudero Hernanz, Ernesto Martín, Germán Ros, Hilario Gómez, José Manuel Arco, Roberto Costas, Javier Macías, Sergio Lafuente y María Concepción Batanero
Creación de entornos personales de aprendizaje en la práctica docente con alumnos universitarios.... 529
Juan Domingo Aguilar Peña, Catalina Rus Casas, Dolores Eliche Quesada, María Dolores Rubia García y David Álvarez Jiménez
Medida de variables con Arduino en la asignatura Instrumentación Electrónica 536
Catalina Rus Casas, Gabino Jiménez Castillo, Álvaro Fernández Solas, Juan Ignacio Fernández Carrasco y Francisco José Muñoz Rodríguez
Aprendizaje-servicio como innovación estratégica en la enseñanza de la electrónica..... 542
Inmaculada Plaza García, Carlos Medrano Sánchez, Raúl Igual Catalán, Ana Serrano, Esther Sainz, Mariano Ubé e Isabel Saz
Adaptación de las prácticas de la asignatura de Instrumentación Electrónica a la modalidad semipresencial 548
Carlos Medrano Sánchez, Raúl Igual Catalán, Inmaculada Plaza García, Antonio Bono Nuez y Bonifacio Martín del Brío
Electric machine course teaching reform in the background of new Engineering Construction... 556
Guoliang Yang, Ying Xiao and Yuepeng Wang
Programación de interfaces naturales mediante la combinación de sensores de teléfonos móviles.... 561
Javier Hernández Aceituno e Isabel Sánchez Berriel
Control de una Mano Biónica usando técnicas de reconocimiento de gestos en tiempo real a través del Leap Motion 569
Jesús Sergio Artal Sevil, José Luis Montañés Romero, Andrea Acón y José Antonio Domínguez Navarro
Diseño de un brazo robótico de bajo coste controlado por sensores EMG superficiales 576
Jesús Sergio Artal Sevil, Andrea Acón, José Luis Montañés Romero y José Antonio Domínguez Navarro

Demostradores

Ejemplo de diseño FPGA para medidas de máximas frecuencias de operación 587
Carlos J. Jiménez Fernández, Carmen Baena Oliva, Pilar Parra Fernández, Francisco E. Potestad Ordóñez y Manuel Valencia
Medición de distancias como ejemplo práctico de diseño en FPGAs 593
Carlos J. Jiménez Fernández, Pilar Parra Fernández, Carmen Baena Oliva, Francisco E. Potestad Ordóñez y Manuel Valencia
WebLab-Boole-Deusto: Plataforma web para el diseño y test en laboratorio remoto de sistemas digitales combinacionales básicos 597
Javier García Zubia, Eneko Cruz, Ignacio Angulo, Luis Rodríguez Gil, Unai Hernández Jayo, Pablo Orduña y Borja Sotomayor Basilio
Entrenador de comunicaciones digitales basado en FPGA controlado mediante LabVIEW 603
Oswaldo B. González Hernández, Manuel J. Rodríguez Valido, Alejandro J. Ayala Alfonso, Silvestre Rodríguez Pérez y Beatriz Rodríguez Mendoza
Diseño de plataforma de robots evolutivos, para la posterior impartición de talleres a jóvenes de altas capacidades 609
Nicolás Adrián Rodríguez Linares, Antonio Mampaso, Iván Jesús Torres Rodríguez y Alberto Díaz Rodríguez
Iluminando a través de la robótica educativa 617
Pedro Plaza Merino, Elio San Cristóbal Ruiz, Germán Carro, Manuel Castro Gil, Manuel Blázquez y Félix García Loro
Sinergia LEGO Mindstorms – Arduino: aprovechamiento de las ventajas de ambas plataformas 624
Emilio Fernández Moreno y Julio Pastor Mendoza

SESIÓN I.A: SISTEMAS DE COMUNICACIÓN / PROCESADO DE SEÑAL 1

Project Based Learning Methodology Applied to Radiofrequency Subject

Héctor Solar
Department of Electrical and Electronic Engineering
University of Navarra (Tecnun)
San Sebastian, Spain
hsolar@tecnun.es

David del Río
Information and Communication Technology Division
CEIT
San Sebastian, Spain
ddelrio@ceit.es

Andoni Beriain
Department of Electrical and Electronic Engineering
University of Navarra (Tecnun)
San Sebastian, Spain
aberain@tecnun.es

Roc Berenguer
Department of Electrical and Electronic Engineering
University of Navarra (Tecnun)
San Sebastian, Spain
rberenguer@tecnun.es

***Abstract*— The Project Based Learning (PBL) is a teaching method in which students gain knowledge and skills by working for an extended period of time to respond to a challenge. This methodology is being applied to the subject of Radiofrequency carried out by the students of Telecommunication Systems and Communication Electronics Engineering degrees at the School of Engineering (Tecnun) of the University of Navarra. This subject is devoted to the design of the analog front-end of transceivers for wireless communications. As part of the subject a project is included, in which the students are asked to design, simulate build and validate a LTE receiver (Rx) at the 800-MHz band.**

Keywords*— *Project Based Learning, Radiofrequency, LTE receiver

I. Introduction

The subject of Radiofrequency at the Technological Campus of the University of Navarra is devoted to the design of the analog front-end of transceivers for wireless communications. It is a 6th semester subject for both Telecommunication Systems and Communication Electronics Engineering degrees.

The theory content is structured in such a way that the tools required to design a communication link complying with a specific standard are provided to the students. The main theory blocks are:

- Standard description: The students learn how to approach the physical layer of a standard, extract the main system parameters and translate them into requirements imposed to a transceiver aimed to fulfill that standard. Main topics are: network types, digital modulations, multiple access techniques, physical layer requirements and test, etc.
- Component performance: This part of the Radiofrequency subject reviews the main components of a transceiver chain and discusses their most important parameters, its role inside the chain, implementation issues, etc.

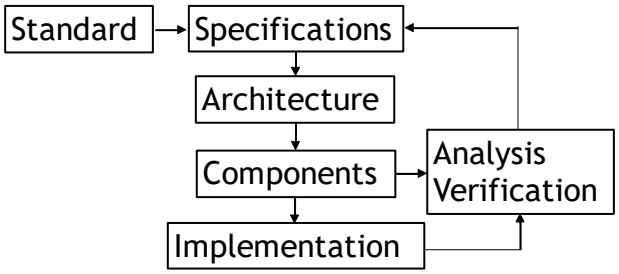


Fig. 1. Receiver design flow.

- Transceiver architectures: This aspect covers the main architectures employed for transceiver implementation and the criteria to choose the most convenient solution given the specific standard requirements.
- DCS 1800 case: The specific case of DCS 1800 standard is analyzed from the standard documentation to its translation into Receiver requirements in term of noise, linearity and dynamic range. An example of a Rx using actual Radiofrequency (RF) components is also given in order to introduce the students to the simulation tool. It serves as a first example for the students to perform their own analysis.

As it has been mentioned, the objective of theory lessons is that the students acquire the tools to carry out a specific project. The project is focused on the design of a RF Rx that has to fulfill a specific communication standard. The goal of the project proposed to the students is to go through the different steps of an actual Rx design: choice of the proper architecture, analysis of a communication standard and setting up of the component parameters and system simulation, test and validation of the Rx design. The project is introduced to the students as a challenge among different teams. The winner is the team that gets the best Figure of Merit (FOM) for their Rx design while complying with the chosen standard.

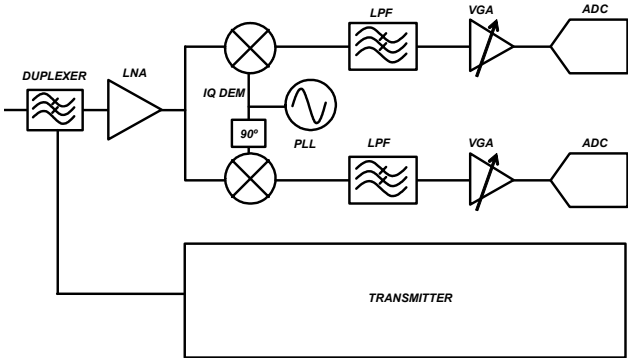


Fig. 2. Receiver architecture.

The rest of the paper is structured as follows. Section II gives a detailed view of how the project is structured and how it is carried out by the students. Section III summarizes the material that is used for the project. Section IV shows the results. Finally, Section V concludes the paper.

II. PROJECT DESCRIPTION

As it has been aforementioned, the project is carried out by the students in parallel to the theory lessons. The information about the specific standard, different milestones, templates is announced through the term. Introductory lessons inform them about the design flow that they will follow for the project realization, as shown in Figure 1.

A. Communication Standard

The DCS 1800 standard is used in sessions as first example. However, the students are required to work with a more modern standard. Specifically, the chosen standard is 3GPP LTE Release 11 (ETSI TS 136 101). It must be noted that the analysis that the students have to conduct is simplified. Namely, they are asked to extract information specifically for a fixed channel bandwidth of 10 MHz without Carrier Aggregation, using band 20 (800 MHz) and Frequency Division Duplexing (FDD) [1]. The students are provided with the actual standard documentation for the User Equipment radio transmission and reception along with relevant paper links, useful for the analysis [2]-[5].

B. Milestones

Project development consists on the following steps:

1) LTE requirements analysis

The students must translate the LTE requirements into Rx requirements in terms of noise, linearity and dynamic range. Specifically, Table I shows the list of requirements the students have to provide.

TABLE I. RX SPECIFICATION LIST

Component	Parameter	Description
Rx	NF	Rx Noise Figure
Rx	IIP3	Rx Third Order Intercept Point
IQDEM	IIP2	IQ Demodulator Second Order Intercept Point
PLL	Phase Noise	PLL Phase Noise
Duplexer/LNA/ IQDEM/PLL	Antenna Leakage	Rx Antenna Leakage
PLL	Spurs	PLL Spur level
VGA	ΔGain	VGA Gain Range
ADC	SNR	ADC Dynamic Range

The students are provided with a template document as a help to look for the information within the documentation and also to learn how to interpret the different standard sections so that Rx parameters are extracted. For example, as shown in Table II, the template helps them to extract linearity requirement from intermodulation, Tx leakage or cross modulation effect.

TABLE II. TEST CASES FOR IIP3, IIP2 AND PHASE NOISE

Parameter	Test Cases
IIP3	Intermodulation test Intermodulation of Tx Leakage + Out-of-band Blocker (OOB) Cross modulation of Narrow Band Blocker (NBB) with Tx Leakage Cross modulation of Adjacent Channel with Tx Leakage-Case1 Cross modulation of Adjacent Channel with Tx Leakage-Case2
IIP2	Tx Leakage In Band Blocking (IBB)-Case1 In Band Blocking (IBB)-Case2 Adjacent Channel-Case1 Adjacent Channel-Case2 Second order intermodulation
Phase Noise	Narrow Band Blocker (NBB) In Band Blocking (IBB)-Case1 In Band Blocking (IBB)-Case2 Adjacent Channel-Case1 Adjacent Channel-Case2

2) Architecture and Component selection

Next step in the design process is to choose the proper architecture for the Rx with its pros and cons. The Rx architecture is required to be compact and so a direct conversion Rx architecture is suggested, as shown in Figure 2. Along with this, students should choose the components that best fit the design of a Rx complying with LTE-Release 11 while maximizing the FOM. Students may choose components from a list of possibilities. Namely, the available components are the ones shown in Table III.

TABLE III. RF COMPONENTS

Component	Model	Supplier
Duplexer	B8622	TDK-Epcos
LNA	ADL5521	Analog Devices
LNA	TQP3M9036	Qorvo

Component	Model	Supplier
LNA	TQL9092	Qorvo
LNA	QPL9065	Qorvo
IQ Demodulator	ADL5380	Analog Devices
IQ Demodulator	ADL5382	Analog Devices
IQ Demodulator	ADL5387	Analog Devices
PLL	ADF4350	Analog Devices
PLL	ADF4355	Analog Devices
VGA	AD8366	Analog Devices
VGA	AD8372	Analog Devices
VGA	ADRF6510	Analog Devices
VGA	ADRF6518	Analog Devices

The components listed in Table III are available as evaluation boards. The main advantage is that the students save the time that would be needed for PCB design and fabrication, component soldering, error correction, etc. All these design skills are covered by other subjects through their Engineering degrees. In addition, evaluation boards come with 50Ω impedance matching at their inputs and outputs so that board connection is direct without worrying about impedance mismatches. A drawback is that input and output transformers added for impedance matching introduce extra losses that degrade the actual performance of components. However, as long as they have to characterize the components of their choice, they must take this into account.

In addition to RF components, the student must also choose a proper ADC in terms of sampling frequency, input swing and dynamic range.

3) Rx simulation

Based on the family of available RF components the students must now justify a correct design of a LTE Rx using Advanced Design System (ADS) Tool from Keysight [6]. The students have to validate it by carrying out ADS simulations that demonstrate that the LTE requirements have been fulfilled with the chosen combination of components.

There is an introductory laboratory session at which a Rx complying with the DCS 1800 standard is simulated. Therefore, the students learn how they should work in order to characterize their own architecture complying with the LTE standard.

4) Rx implementation and test

Once the students have validated their design they must implement it in reality. There are several laboratory sessions so that they first gain familiarity with the equipment and test procedures. In fact, the first session is an introduction to test equipment and test procedures in order to correctly characterize gain, linearity, noise and power consumption of components. Later on, they must be able to perform the characterization of the whole Rx. Next section details the equipment the students can work with.

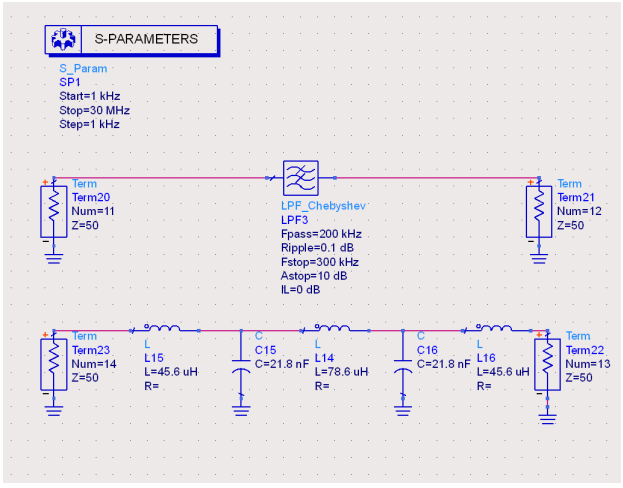


Fig. 3. ADS Schematic view of a simulated low pass filter.

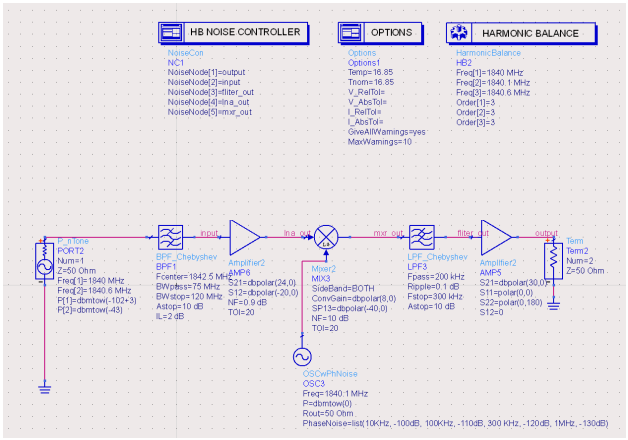


Fig. 4. ADS Schematic view of a simulated Receiver.

5) Low pass filter design and fabrication

Students are also required to design, fabricate and test a passive low pass filter of the type and order they consider the most suitable. In a previous subject they have learned how to synthesize a filter although online tools are also suggested [7]. They can implement, simulate and include their chosen filter in ADS, as shown in Figure 3. Later on, they fabricate the filter by means of surface-mount device (SMD) Inductor, Resistor and Capacitor kits available in the laboratory.

Implementation of the filter by means of commercially available inductor, capacitor and resistor values, makes them learn to adjust the final filter performance to components that are actually available in the market.

C. Figure of Merit

The FOM equation compares the quality of the design by using (1).

$$FOM=10^{6}/(Cost(€@1K)*\Sigma V_{DD}(V)*I_{DD}(mA)) \quad (1)$$

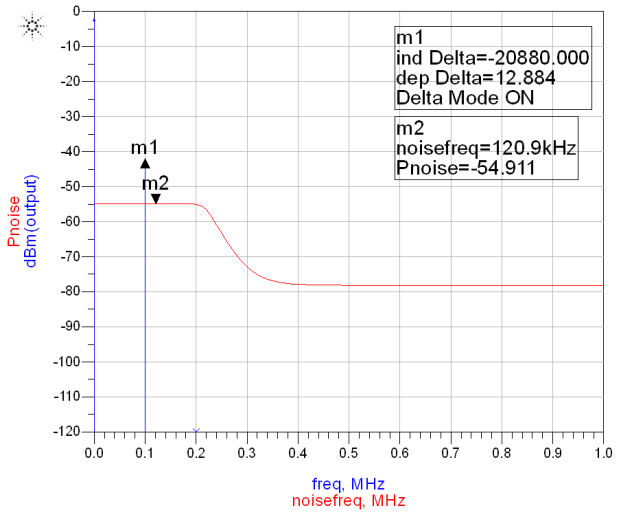


Fig. 5. ADS simulated results for sensitiviy.

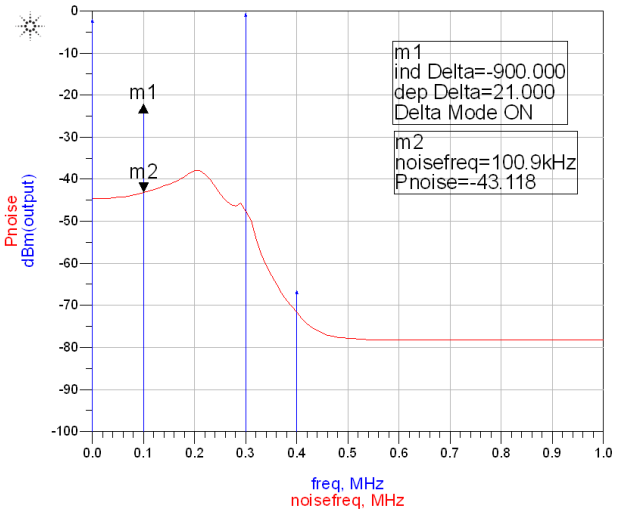


Fig. 6. ADS simulated results for noise and reciprocal mixing.

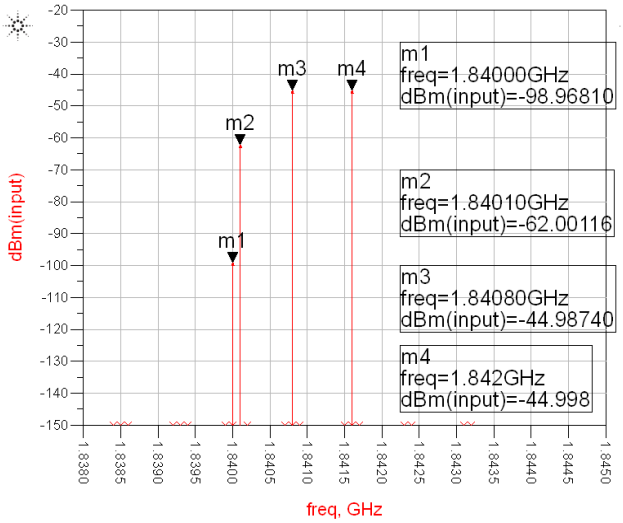


Fig. 7. ADS simulated results PLL leakage.

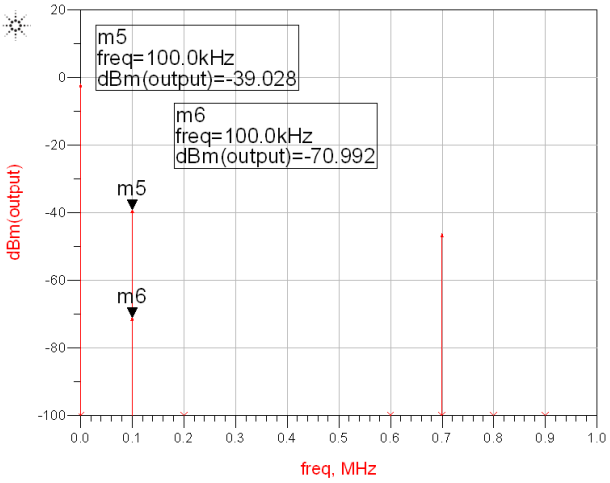


Fig. 8. ADS simulated results for third order intermodulation distortion.

It must be noted that solutions are not compared in terms of noise or linearity performance. All the proposed solutions must fulfill standard requirement, therefore the final winner is the one that achieves it with the least power consumption and cost. It is a good exercise not to just get the best solution in terms of RF performance but to take into account some other important aspects in the design process.

III. Project Resources

A. System Simulation Tool

As it has been already mentioned, the main simulation tool for the Rx performance simulation is Advanced Design System (ADS) tool from Keysight [6]. Students learn how to perform ADS simulations by selecting components from the available list and configure them in terms of gain, noise, linearity, isolation, etc. Noise, linearity and gain simulations are carried out by mean of the Harmonic Balance, Noise Controller and S-parameter simulation boxes.

An example of the schematics of a simulated Rx is shown in Figure 4. Several examples of simulations for the Rx are shown next. Figure 5 shows Signal-to-Noise ratio (SNR) results combining noise and the output channel modelled as a carrier signal with minimum input power level. Figure 6 shows the sensitivity degradation due to the effect of reciprocal mixing of the PLL phase noise with one of the interferers specified by the standard. Figure 7 shows the results of the PLL leakage at the antenna terminal. Finally, Figure 8 shows the signal to distortion ratio of the third order intermodulation test results at the output of the receiver.

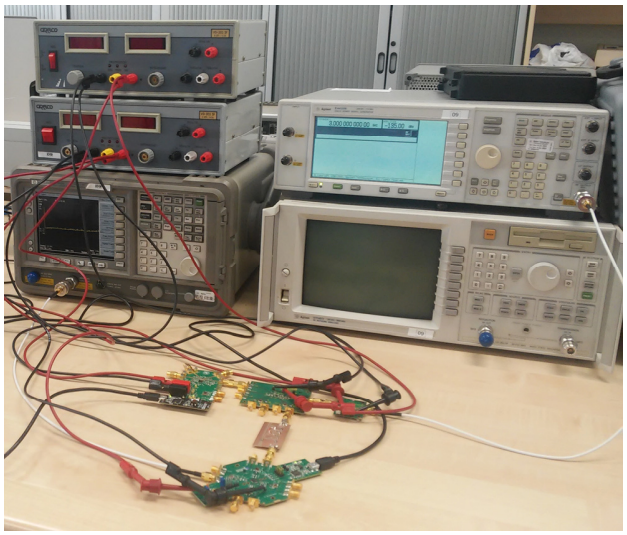


Fig. 9. RF equipment test bench.

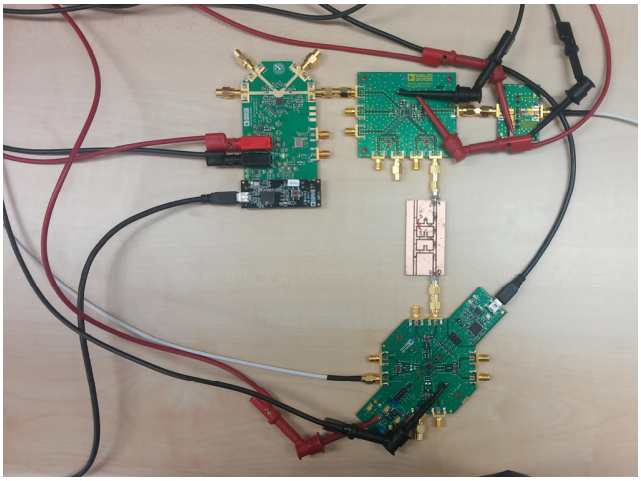


Fig. 10. Receiver hardware implementation.

B. *Test equipment*

Student teams have RF equipment available for the Rx testing and validation. The detailed list is shown in Table IV while a photograph of the laboratory test bench is shown in Figure 9. With the available equipment the students must validate the simulation results regarding noise, linearity and dynamic range of their Rx.

TABLE IV. RF EQUIPMENT

Equipment	Description
Agilent E4402B	Spectrum Analyzer
Agilent 8714ET	Vector Network Analyzer
Agilent E4432B	Signal Generator
Grelco VD 305	Power Supply
Agilent 346A	Noise Source

C. *Test kit*

The students have several test kits with material for the Rx test. Cables, adapters and connectors provided to them are based on SMA-type connector as it is the connector type for RF components commercially available. Table V lists the material that the test kit for each team contains. The quantities are calculated so the parts allow several teams to work in parallel with the different RF components. Students have to coordinate in order to optimize the testing time.

TABLE V. TEST KIT COMPONENTS

Component	Qty
SMA 50Ω load	7
SMA JACK to SMA JACK Connector	1
SMA PLUG to SMA PLUG Connector	7
N-PLUG to SMA-JACK Connector	6
N-JACK to SMA-JACK Connector	1
BANANA to Grabber Adapter Red	6
BANANA to Grabber Adapter Black	6
BANANA-BANANA Cable Red	6
BANANA-BANANA Cable Black	6
SMA-SMA Cable 50CM LENGTH	6
SMA-SMA Cable 15CM LENGTH	7
Power Splitter (MINICIRCUITS)	1
Calibration KIT SMA SHORT-OPEN	1
Calibration KIT SMA LOAD	1
Calibration KIT SMA JACK to SMA JACK	1

IV. RESULTS

Students have to report their achieved results for the project. They must first report the RF component requirements obtained from the LTE standard analysis. In addition, they must show a complete set of simulations in ADS that indicate that the choice of components for their Rx complies with the LTE specifications. Furthermore, the report must show the laboratory tests results, a comparison and discussion of the measured and simulated results. They need also to check component prices for potential fabrication quantities of 1K. Finally, they need to add their conclusions and the calculation of the FOM for their design. Figure 10 shows an example of an implemented receiver built by the connection of the evaluation boards and the fabricated low pass filter.

V. CONCLUSION

Students experiment the design process of a Rx covering its different steps: state-of-the-art standard analysis, architecture and component selection, filter design and fabrication and Rx simulation, test and validation. They also deal with the tradeoff

of any design in terms of costs, power consumption and requirement fulfillment. Finally, documentation, components, software and equipment are chosen from the state of the art providers.

REFERENCES

[1] LTE Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 11.2.0 Release 11), ETSI Technical Specification, 2012.

[2] Third Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE L-Band Technical Report (Release 10) (3GPP TR 36.813 V10.0.0 (2011-01)), ETSI Technical Report, 2009.

[3] Stefan Kählert, "Frequency Agile Filter Concept for Wireless Whitespace Receivers," Ph.D. Dissertation, Aachen University, Aachen, Germany, 2013.

[4] C.W. Liu and M. Damgaard, "IP2 and IP3 Nonlinearity Specs for 3G/WCDMA Receivers," High Frecuency Electronics, pp. 16–25, June 2009.

[5] St. Sesia, I. Toufika and M. Baker, LTE-The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice, 2nd ed., Chichester, UK, Wiley, 2011.

[6] Keysight Tech., Advanced Design System (ADS) software. [Online]. Available: https://www.keysight.com/en/pc-1297113/advanced-design-system-ads.

[7] Tony Fisher, LC Filter Design [Online]. Available: https://www-users.cs.york.ac.uk/~fisher/lcfilter/

Estudio del Impacto de Actualización Tecnológica en Docencia de Grado y Máster de Ingeniería

Francisco Falcone, and Leyre Azpilicueta Fernandez
Dpto. Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Universidad Pública de Navarra
Pamplona, España
francisco.falcone@unavarra.es

Ana Vazquez Alejos
Dpto. Teoría de la Señal y Comunicaciones
Universidad de Vigo
Vigo, España
analejos@uvigo.es

***Abstract*—Una de las cuestiones fundamentales en el diseño curricular de asignaturas, tanto en docencia de Grado como de Máster en Ingeniería es la inclusión de elementos de carácter práctico, así como la actualización del estado del arte de la tecnología en la disciplina específica. Dicho objetivo ha de ser correctamente integrado junto con asentar competencias tanto transversales como conocimientos de corte fundamental. En este trabajo se analiza la metodología seguida en diversas asignaturas tanto de Grado como de Máster de Ingeniería Informática como de Ingeniero de Telecomunicación.**

Index Terms—Actualización Tecnológica, Sinergia Universidad-Empresa, Estado del Arte.

I. Introducción

La actualización de contenidos y del estado del arte en diversos ámbitos tecnológicos es uno de los elementos fundamentales a la hora de transmitir conocimiento en el espacio universitario, tal y como recogen los organismos de acreditación [1,2]. Esto cobra especial relevancia en el ámbito de ingeniería, en el que se encuentran ligados de manera estrecha los últimos avances de investigación con aquellas soluciones tecnológicas disponibles en el mercado. Adicionalmente, los agentes empresariales, en relación con la Universidad, buscan dicha actualización tecnológica, tanto para los perfiles de estudiantes egresados, para la realización de prácticas laborales o curriculares, o para explorar el desarrollo conjunto de proyectos de investigación.

La inclusión de dichos elementos de actualización tecnológica conlleva su adecuada planificación, tanto desde el punto de vista de su encaje temporal en las diferentes asignaturas, de empleo de recursos en el desarrollo docente y su impacto en la impartición de contenidos de carácter más fundamental o transversal, así como del desarrollo de actividades prácticas. A lo expuesto anteriormente, cabe mencionar la búsqueda de casos de estudio o de desarrollo tecnológico que puedan combinar tanto estado del arte a nivel científico, como últimas tendencias en el sector industrial correspondiente.

En este trabajo, se presentan iniciativas de inclusión de actualización y vigilancia tecnológica en diversas asignaturas, mediante diversas acciones, tanto de Grado como de Master, de Ingeniería Informática e Ingeniería de Telecomunicación.

II. Contexto de las Titulaciones y Asignaturas Bajo Estudio

El marco en el cual se desarrollan las actividades descritas en este trabajo es el de enseñanzas, tanto de Grado como de Máster, adscritos a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, de la Universidad Pública de Navarra. Concretamente, se valorarán experiencias realizadas en las titulaciones de Grado de Ingeniero de Telecomunicación, Grado de Ingeniero Informático, Máster de Comunicaciones y Máster Ingeniero de Telecomunicación. Dentro de dichas titulaciones se seleccionan asignaturas que tienen como nexo el estudio, en diversos niveles, de sistemas de comunicación, tanto desde el punto de vista de capa física como de desarrollo de aplicaciones y servicios. El listado de las titulaciones así como de las asignaturas se muestra en la Fig. 1.

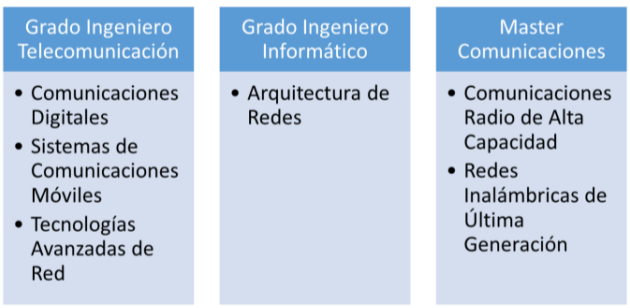


Fig. 1 Esquema con las titulaciones y las asignaturas en las cuales se han desarrollado las actividades de actualización tecnológica.

A continuación se detalla el contexto en el cual se desarrollan las diferentes asignaturas:

- *Grado de Ingeniero de Telecomunicación*: Dentro de los diferentes itinerarios posibles dentro de la titulación, se han seleccionado las siguientes asignaturas que se describen a continuación:
  - *Comunicaciones Digitales*: se trata de una asignatura impartida en el segundo curso de la titulación de Ingeniero de Telecomunicación, en la cual se describen diferentes procesos propios de sistemas de comunicaciones digitales. Se trata de una asignatura de corte fundamental, en la cual se mencionan de manera introductoria algunos aspectos propios de redes, concretamente técnicas de multiplexación aplicados tanto a redes de comunicaciones móviles, sistemas de radiodifusión y sistemas de provisión de servicios domésticos, tales como ADSL.
  - *Sistemas de Comunicaciones Móviles*: Esta asignatura se imparte en el cuarto curso de la titulación de Ingeniero de Telecomunicación, dentro de la especialidad de Sistemas de Comunicaciones. Es una asignatura centrada en la descripción de múltiples funcionalidades propias de sistemas de comunicaciones móviles, con especial énfasis en redes móviles 3G y 4G. En este caso, la aplicación tecnológica es una parte esencial de la asignatura, requiriendo actualización tanto a nivel de sistemas como de aplicaciones y servicios ofertados.
  - *Tecnologías Avanzadas de Red*: se trata de una asignatura que se imparte en la especialización Telemática del Grado de Ingeniero de Telecomunicación, en el tercer curso. En este caso, se realizan estudios sobre el análisis de traceos y análisis de protocolo aplicables a diferentes redes de comunicaciones. Entre ellas, se hace mención tanto a redes cableadas locales y metropolitanas (con especial énfasis en redes Ethernet e IP), como en redes de comunicaciones móviles (desde redes GPRS hasta LTE).

- *Grado de Ingeniero Informático*: en este caso se ha seleccionado una asignatura, ligada de manera unívoca al conocimiento, diseño, dimensionamiento y análisis de redes de comunicaciones:
  - *Arquitectura de Redes*: Se trata de una asignatura que ofrece una panorámica sobre redes de comunicaciones, tanto desde el punto de vista de elementos que componen una red de conmutación de paquetes, como de la arquitectura, en diferentes niveles, de protocolos de comunicaciones. De esta manera, se describen de manera genérica los servicios y funciones de los diferentes niveles de la pila de protocolos, como aspectos concretos de los mismos, tal y como son las diferentes implementaciones a nivel de capa física, como la descripción de estándares de empleo extendido, tal y como son Ethernet y protocolo IP (tanto TCP como UDP).

- *Master de Comunicaciones*: en este caso, se trata estudios de posgrado, cuyo alumnado procede principalmente de las titulaciones de Ingeniero de Telecomunicación. Se describen a continuación las asignaturas bajo estudio:
  - *Comunicaciones Radio de Alta Capacidad*: se trata de una asignatura de especialización, centrada tanto a la caracterización a nivel de comportamiento de canal radioeléctrico, como de diversas funcionalidades de sistemas de comunicaciones móviles 3G-4G, como de redes WiMax y de sistemas de transporte de microondas basados en Jerarquía Digital Síncrona. Se analizan de manera explícita diversas configuraciones de redes operativas y de soluciones aplicadas en el mercado, con el fin de poder ofrecer una visión actual del estado del arte de redes comunicaciones inalámbricas, con especial énfasis en aquellas de transporte de datos de alta capacidad.
  - *Redes Inalámbricas de Última Generación*: se trata de una evolución de la asignatura anterior, implementada en el nuevo máster de Ingeniero de Telecomunicación, continuación del Máster en Comunicaciones previamente implementado. En esta nueva asignatura, los contenidos se migran hacia soluciones de redes distribuidas (redes 4G, redes 5G y redes de sensores inalámbricos). En este caso, varios de los contenidos de la asignatura corresponden con soluciones que existen de momento en bancos de prueba experimentales, como son las redes 5G y ciertas soluciones con protocolos de enrutamiento y de enlace propios de redes colaborativas y de redes heterogéneas, también conocidas como redes HetNet. Se introducen contenidos relativos a soluciones empleadas de manera comercial, tal y como son los repartos de carga de tráfico en redes móviles y redes WiFi (i.e., técnicas de WiFi offload).

III. Actividades Realizadas y Resultados Obtenidos

Con el fin de poder llevar a cabo la labor de inclusión de contenidos de actualización tecnológica en las diversas asignaturas descritas en la sección anterior, se han desarrollado una serie de actividades y de contenidos que se han incluido en el desarrollo docente de las mismas. Tal y como ya se ha comentado anteriormente, el objetivo es poder acercar a los alumnos a la realidad tanto desde el plano operativo, como de los servicios, aplicaciones y perspectiva de clientes de diversos tipos de redes de comunicaciones.

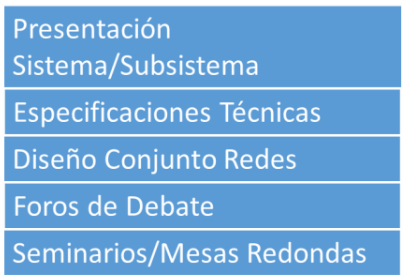


Fig. 2 Enumeración de las diversas actividades que se han desarrollado en las asignaturas con el objetivo de incrementar en nivel de actualización tecnológica de las mismas.

La inclusión de este tipo de contenidos a priori persigue los siguientes objetivos:

a) Afianzar las nociones sobre soluciones comerciales, desde una perspectiva de conocimientos que pueden aportar valor añadido de cara a un potencial empleador.

b) Incrementar el nivel de interés y de participación de los alumnos al poder observar soluciones y modelos de servicio y de negocio ya en fase de explotación comercial.

La introducción de dichos contenidos en las asignaturas se ha llevado a cabo mediante el empleo de las siguientes herramientas, que se muestran de manera esquemática en la Fig. 2:

a) *Descripción de soluciones comerciales de sistemas/subsistemas descritos en clase*: de esta manera, tras la descripción teórica de una solución de red, se pone como ejemplo que se comenta en clase, en el desarrollo habitual de la asignatura. Como ejemplos, se ha trabajado la arquitectura de sistemas móviles de redes 2G, 3G y 4G, así como la implementación de subsistemas propios de estaciones base de redes móviles.
b) *Análisis de Especificaciones Técnicas*: se propone como trabajo individual, para realizar fuera del aula, la búsqueda de especificaciones técnicas de diversos componentes o elementos de red. Ejemplos habituales son dispositivos, tales como conmutadores, enrutadores o enlaces radioeléctricos. Dichas especificaciones son posteriormente debatidas en clase de manera colectiva y se comparan con el fin de poder establecer un ranking de las mismas.
c) *Realización de diseños de red*: se realizan, en sesiones de ejercicios de trabajo en grupo, en grupos habitualmente de 4 alumnos, propuestas de diseño de red o de subsistemas de red. En este caso, se suele combinar el trabajo en dichas sesiones como trabajo fuera del aula, fundamentalmente orientado a la búsqueda de la información concreta relativa a los elementos cuyas especificaciones técnicas han buscado y que ya conocen. Los trabajos posteriormente, de manera esquemática, se redactan en grupos y se suben a un repositorio común observable por todos los usuarios. Como ejemplo, se han realizado diferentes diseños de redes de campus, con el fin de poder prestar diferentes niveles de servicio y empleando soluciones de equipamiento de diferentes suministradores tecnológicos, disponibles de manera comercial.
d) *Foros de debate*: dentro de los sitios web de las diferentes asignaturas, todas ellas programadas en Sakai, se abren foros de debate, en los cuales se comparten discusiones específicas sobre cuestiones relativas a soluciones tecnológicas. Por ejemplo, se puede debatir, en términos de coste, de prestaciones, de servicio y de imagen de marca, dos equipos que prestan en principio una funcionalidad similar. Los debates en principio son abiertos, habilitando opciones de múltiples entradas por cada uno de los usuarios, así como la posibilidad de poder expresar cualquier opinión, siempre que se ajuste a normas de cortesía elementales. Como ejemplos, se han comparado tecnologías de terminales móviles, como iPhone vs Android, o plataformas de prestación de servicios Cloud.
e) *Seminarios*: se han realizado diversos seminarios en los cuales profesionales en activo comparten con los alumnos sus experiencias y conocimientos, aplicados de manera explícita en el ámbito de las redes y de los servicios de comunicaciones. El formato habitual de trabajo consiste en una presentación realizada por el ponente y una posterior ronda interactiva con los alumnos. En ocasiones también se han realizado mesas redondas (por ejemplo, con temáticas de corte transversal, como es el caso de Smart Cities), en el cual diversos ponentes tratan desde distintas ópticas la temática en cuestión (relativa en cualquier caso a las redes y servicios de comunicaciones).

Para poder analizar el impacto en la aplicación de todas estas iniciativas, se ha realizado un análisis de corte cualitativo, basado en la interacción directa tanto con los alumnos como con los ponentes y docentes involucrados en dichas actividades. Dicho análisis se basa en entrevistas directas a dichos colectivos, cuyas opiniones se reflejan a continuación:

- Desde la perspectiva de los alumnos:
  - La inclusión de materiales relativos a tecnologías específicas hace más ameno el desarrollo en clase e incrementa el nivel de interés en la asignatura.
  - Buscar información sobre especificaciones técnicas se percibe como información cercana a mercado y por lo tanto, de interés desde el punto de vista de potencial empleabilidad.
  - La realización de trabajos en grupos relativos al diseño de red se percibe como una tarea que resulta entretenida para los alumnos, tanto por la búsqueda de información técnica, como por el debate y

competición que surge a la hora de presentar las diversas alternativas propuestas por los diferentes grupos presentes en clase.

- Los foros de debate son valorados por los alumnos, aunque con niveles de participación menores que las alternativas previamente comentadas. La mayoría de los debates son iniciados por los profesores, quienes posteriormente lo moderan e invitan a la participación en los mismos. Cabe destacar que en algunas ocasiones los alumnos han abierto por iniciativa propia los debates, aunque son minoritarios frente a los propiciados por los docentes.
- La realización de seminarios y de mesas redondas son actividades valoradas de manera muy positiva por los alumnos entrevistados en todos los niveles. Se percibe como un elemento de cercanía con el mundo laboral, en el que se observa de primera mano tanto las problemáticas como las dinámicas propias de dicho ámbito laboral. Los alumnos también han indicado algunos inconvenientes, tales como los cambios de horario o la realización de actividades fuera del horario lectivo que en ocasiones es necesario con el fin de poder ajustarse a las agendas de los ponentes implicados. No obstante, valoran por encima de dichos inconvenientes el poder contar con una experiencia de primera mano de dichos ponentes.

- Desde el punto de vista de los *ponentes*, la actividad resulta positiva, tanto por el acercamiento a los alumnos como a la propia universidad. En ocasiones, sobre todo en los niveles más avanzados, dicha interacción ha propiciado la toma de contacto a niveles más profundos con las empresas, resultando en posteriores oportunidades para la realización de prácticas curriculares o trabajos fin de estudios de diverso nivel.

- En cuanto a los *docentes*, la inclusión de este tipo de actividades de actualización tecnológica se percibe, en líneas generales, como un elemento para poder asistir en la fijación de conceptos de corte más fundamental, así como un elemento necesario para poder actualizar el estado del arte y el valor añadido de los contenidos impartidos en potenciales términos de empleabilidad. Además, es un elemento de acercamiento con las empresas participantes, lo que redunda en un beneficio añadido tanto a la actividad docente como investigadora. Como aspecto mejorable, los docentes indican la falta de tiempo en la programación docente, lo que en ocasiones obliga a la realización de ajustes de dicha programación o en la realización de actividades fuera del horario lectivo inicialmente planificado.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo, se han desarrollado una serie de contenidos, para ser trabajado tanto de manera presencial como a través de plataforma de apoyo basado en Sakai para las asignaturas, ligadas al ámbito de Sistemas de Comunicaciones y Redes de Comunicaciones. Para ello, se han desarrollado píldoras de contenido específico para ser trabajado en clase, realización de estudios de diseño de sistemas como trabajo en grupo, análisis de especificaciones de equipos de manera individual y presentaciones en formato taller de trabajo sobre tendencias y visión de futuro de redes de comunicaciones. Se ha analizado la respuesta de los alumnos a dichos contenidos, de los docentes implicados y de representantes del sector industrial, con el fin de poder valorar el impacto de dichos contenidos tanto en el proceso formativo como en de planificación y desarrollo docente, mostrando en general opiniones positivas al respecto.

De cara al futuro, se está planificando el desarrollo de actividades adicionales, tales como encuentros interactivos con la industria y centros de investigación, o el desarrollo de actividades de emprendimiento tecnológico en el aula.

REFERENCIAS

[1] S. Adam, “Using learning outcomes, A consideration of the nature, role, application and implications for European education of employing 'learning outcomes' at the local, national and international levels”, Bologna Seminar, Edinburgh, United Kingdom, 1-2 July 2004.

[2] E. Coyle. Engineering Education in the US and the EU, Chapter 5 in Engineering in Context. Academica, 2009

[3] ENAEE, “EUR-ACE Framework Standards for the Accreditation of Engineering Programmes”, 2008; www.enaee.eu [ENAEE Documents]

[4] ABET, “The ABET criteria for accrediting engineering programmes”, 2009, www.abet.org

[5] “European ministers of education, The European higher education area -Bologna declaration-,” in Joint Declaration of the European Ministers of Education, Bologna, Italy, 1999.

[6] “European university association, Salamanca convention 2001,” in The Bologna Process and the European Higher Education Area, Salamanca, 2001.

[7] “European ministers of education, Towards the European higher education area,” in Commun. Meet. Europ. Ministers in Charge of Higher Education, Prague, 2001.

[8] “European ministers responsible for higher education, The European higher education area -Achieving the goals-,” in Commun. Conf. Europ. Ministers Responsible for Higher Education, Bergen, 2005.

[9] Bergan, S. and Rauhvargers, A., Eds., “Recognition in the Bologna process: Policy development and the road to good practice,” Council of Europe Higher Education, ser. 4, 2006.

[10] ECTS Users’ Guide, European Credit Transfer and Accumulation System and the Diploma Supplement. Brussels, Belgium: Directorate- General for Education and Culture, 2005.

Educational platform for communications using the MQTT protocol

D. Matabuena, F.J. Bellido-Outeiriño, A. Moreno-Muñoz, A. Gil-de-Castro, J.M. Flores-Arias
Departamento de Ingeniería Electrónica y de Computadores,
Escuela Politécnica Superior de Córdoba, Universidad de Córdoba,
Campus de Rabanales, Edificio Leonardo Da Vinci, E-14071 Córdoba, España.
Email: {p22magod, fjbellido, amoreno, agil, jmflores}@uco.es

***Abstract*— With the emergence of Internet of Things (IoT), appears the necessity of a protocol to handle the data flow of all the smart devices. HTTP (Hypertext Transfer Protocol) is the most used protocol. But, in recent years, new protocols are emerging. Nowadays, the Message Queue Telemetry Transport (MQTT) is one of the most used protocol within IoT, due to its low power and bandwidth consumption. This work presents the implementation of an MQTT protocol into LabVIEW platform providing a powerful tool to assess students training into novel protocols and applications under the IoT paradigm.**

***Keywords*— Educational platform; Internet of Things, MQTT;.**

I. INTRODUCTION

The term Internet of Things (IoT) is increasingly being used in many applications, aiming to connect everyday objects to Internet. This collection of information generates a massive amount of data that should be managed in an efficient way to develop an optimal system [1]. Internet of Energy (IoE) has arisen from the combination of Smart Grids (SGs) and IoT systems. This concept offers many advantages, such as the interaction between different devices. Communication of different machines (M2M) supplies the term of decentralized systems and its introduction into the Wireless Sensor Network (WSN) philosophy, which consists of distributed nodes realizing measurement and control tasks and sending this information between them or with a central node [2], [3]. In [4], an example of the integration of IoT in Demand Response (DR) systems is shown. By using wireless technology, a platform that allows home load control is achieved.

The arrival of the Industry 4.0 creates the necessity to introduce students to IoT systems. However, teaching instrumentation and IoT concept simultaneously is difficult due to the high number of students, the large amount of content of the discipline and the short time available. Thus, educators need to redesign the subject and are obligated to find new ways of integrating students into IoT systems. Therefore, this paper aims to develop a practical lesson that have been used with students enrolled in the Master´s Degree in Distributed Renewable Energies from the University of Cordoba (https://www.uco.es/estudios/idep/masteres/energias-renovables-distribuidas). More specifically in the subject Instrumentation and Metrology, where the students learn the fundaments of measurement techniques and error correction in instrumentation.

This research is supported by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness under Project TEC2016 77632-C3-2-R

The master's degree is focused in Distributed Energy Resources. DER not only refer to small generation nodes located close to consumption areas but includes other resources as energy storage system or even load management resources. Consequently, the distribution network is turning into a complex model that is hard to be controlled [5]. The Smart Grid's (SG) paradigm has emerged as the only viable solution for the seamless integration of these DERs in today power grids. This concept provides a better position for the knowledge of the different issues that presently challenge the electrical network [6]. There are in fact many studies focused on improving the grid characteristics [7], [8].

In [9], the author elaborates an educational platform which reproduces the behavior of a power generation system associated with active loads. This system integrates measurement, protection, stability, analysis and Power Quality (PQ) control features of the distributed system. Furthermore, the ability to create events makes it easier to test the power generation system itself. In this paper, the extension of the Smart Grid Test Bench (SGTB) is proposed. The main objective of this paper is to integrate this system into the IoT philosophy. It will be possible due to the addition of an MQTT protocol library developed in LabVIEW Software (Laboratory Visual Instrument Engineering Workbench). This library has been used to realize a practical lesson with master´s students.

The rest of the paper is as follows. Section 2 describes the laboratory structure and configuration for IoT communication. Subsequently, Section 3 describes the methodology implemented to achieve the integration of the SGTB into an IoT platform, making an extensive description of the communication protocol used. In addition, the created Graphic User Interface is shown. Section 4 presents different techniques that students use in the practical lesson. Finally, Section 5 contains the conclusions.

II. LABORATORY BACKGROUND

As explained in the introduction, this article aims to expand previous research [6] and introduce the SGTB into an IoT environment. The SGTB consists of three main parts: hardware system, communication (MQTT Protocol) and monitoring system and software. Every part is described below.

A. *Hardware System*

The selected hardware platform to implement the broker has been an NI CompactRIO (cRIO) [10] which is at the top level of the developed system. Its architecture is a rugged control embedded system, including a real-time controller, a FPGA module and IO modules. In addition, its Ethernet connection makes it adequated for high efficiency wireless industrial projects. cRIO equipment is treated as Smart Grid's nodes. This equipment allows the addition of input/output modules, which makes it a good option for high-speed control and measurement tasks. Several models have been used as a control system. On the one hand, the cRIOs 907x models use VxWorks operating systems. On the other hand, cRIOs 9030 and 9063 contain a Linux RTOS operating system.

B. *Message Queue Telemetry Transport Protocol (MQTT)*

A wide variety of communication protocols can be applied, such as AMQP, STOMP or MQTT. The main advantage of Advanced Message Queuing Protocol (AMQP) is its reliability and functionality, currently used by Google and NASA. Nevertheless, in comparison to MQTT protocol, it has the disadvantage of high data overload. The Streaming Text Oriented Messaging Protocol (STOMP) is lightweight and text-based [11]. However, it does not offer a reliable exchange. Because of the above reasons, MQTT protocol has been selected to communicate all the nodes of the network. MQTT is a client-server publish/subscribe protocol based on TCP/IP communication. Nowadays, it is used in communication within the Internet of Things (IoT), due to its low power and bandwidth consumption. In MQTT, a client sends a topic subscription request or a publish message to a broker (server). This broker manages the data flow and replies the requests according to the protocol rules. The client's actions are defined below.

On the one hand, the client submits a membership request to a topic with a *subscribe message*. If the broker accepts this petition, the client will receive the publications sent by other MQTT devices, for that topic. On the other hand, the customer can send a *publish message* to a topic, with a defined level of Quality of Service (QoS), that are techniques used to ensure that a receiver captures the message. When the broker receives this communication, redistributes it to every subscribed to the above-mentioned. The user-configured QoS level gives the system a great flexibility, and it is composed of three levels. At level 0, called *At most once delivery*, the sender delivers the publish message just once. As can be seen in Fig 1, it is not possible to know if the subscriber has ever received the message. Greater number of message exchange exists in level 1 (*At least once delivery)* because a recognition response is needed. If the receiver does not reply with an acknowledge message, the transmitter duplicates and resends the delivered message (Fig 2). At *Exactly once delivery* level (QoS 2), the receiver acquires the published message just once. As shown in Fig 3, the sender has an acknowledge message when the broker delivers the message to the subscribers, thus, the publisher assures that listener receives the message. To sum up, the Quality of Service inclusion makes the protocol to be a flexible tool. This allows different level of reliable package reception. However, QoS levels increase the number of exchanged packages. Moreover, a higher QoS level involves an increase of the communication delay. As a consequence, systems with a significant number of nodes connected imply a low quality of service level.

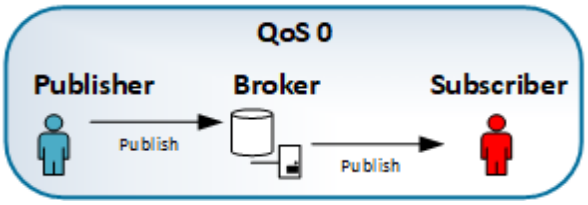


Fig. 1. Message exchange diagram of QoS 0.

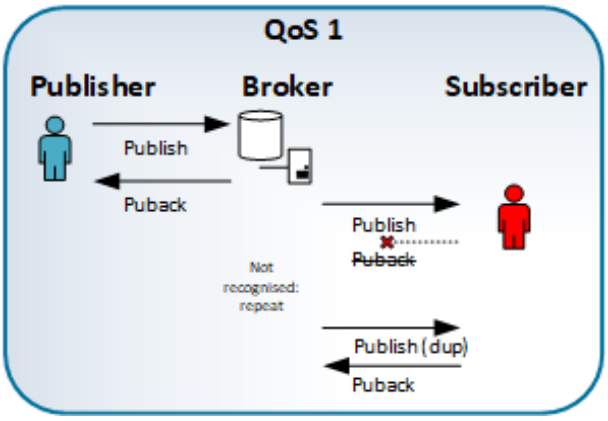


Fig. 2. Message exchange diagram of QoS 1.

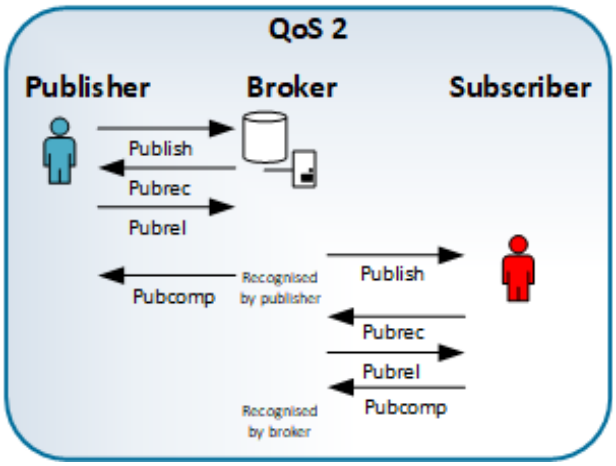


Fig. 3. Message exchange diagram of QoS 2.

C. *Monitoring system and Software*

Finally, there is a monitoring system, with lab-distributed computers. A graphic user interface (GUI) is available (described in section III). This fact enables the control of the data acquisition systems. In addition, LabVIEW has been the programming tool. This software allows testing and debugging the correct functionality of the developed library. For its development, it is essential to know that LabVIEW follows a data flow model to run Virtual Instruments (VIs). A block

diagram node is executed when it receives all the required inputs. As a disadvantage, this software is not open source and a license is required. Despite the above inconveniences, LabVIEW has been used to teach students how to work with technology widely utilized in industrial environments.

III. Final Application

The developed system is included in the laboratory framework. For this reason, cRIO microcontroller linked the reliability assessment platform of power quality and the MQTT platform. The advantage here is that in the meantime, FPGA and I/O modules are able to realize other tasks (i.e. data measurement tasks as explained in Section 2). This software has been used for creating an MQTT protocol-based library. The Application can be summarized in three control loops: Receiving and data processing Control, Transmission Control, and Time Control.

First, the *Receiving and data processing* control loop manages several broker's functions. For this reason, it has been handled with a states machine technique, in which the next state depends on the current state as well as the value of the inputs, as shown in Fig. 4. The possible states are defined in this section. In the Initialize status, the server creates a TCP listener at port 83, specified by MQTT protocol, which is waiting for new connections in the second state called Status Check. While there is no customer's connection, the server is waiting in this subroutine. After detecting a new connection, the control loop advances to Process Data status, which is the most important part of the library. It is composed of several subroutines and functions. To get started, the server expects to receive a new message. After that, it decodes the information encrypted in

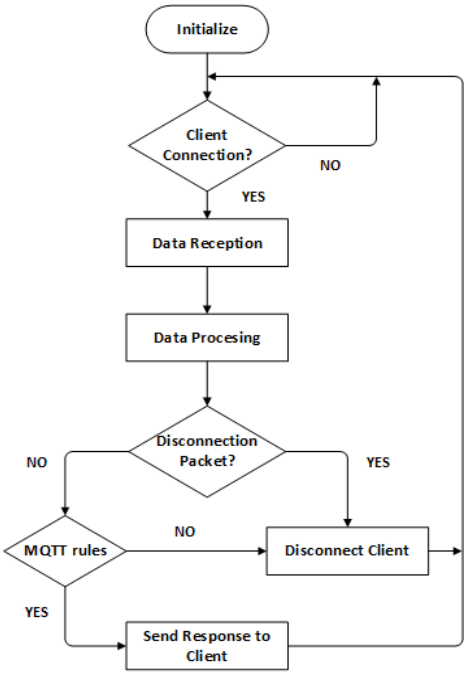


Fig. 4. MQTT communication flow chart

UTF-8 (8-bit Unicode Transformation Format), that is a long variable ISO 10646 standard [12]. The information is saved in LabVIEW class data types (LV Object), allowing its access at every moment.

In addition, diversified types of messages are distinguished according to the literature [13]. Each of them is associated with a subroutine with properties, different from each other. Nevertheless, the SubVIs agree on several aspects. On the one hand, every subroutine must verify that the received packet agrees with the protocol specifications. If not, the client communication is automatically closed. On the other hand, the control loop must insert information into a buffer, called *Enqueue Keep-Alive*, which communicates the *Process Data* control loop with the *Time Control* loop as explained later. Subsequently, if a response to client is needed, the broker assembles a response, in UTF-8, and send it through the transmission loop. The building of a publish packet message is composed of four parts. First, the Fixed Header contains the message type and the QoS level, among other data. Second, Variable Header is composed of the Topic name and the message identification (ID). Payload, which contains the rest of the message, is shown in part C. Afterward, every package is concatenated and sent to the Transmission Control Loop, in part D.

Second, the *Transmission Control* loop is in charge of sending data packages to client(s). It receives codified information from the process control loop by a queue's technique. Later on, in the Transmission subVI, the packet is sent to client, using the TCP-IP port that has previously been opened. Furthermore, to display the number of sent messages, the number of times that this subVI is executed is count. It belongs to a different loop because it was necessary to achieve an independence between reception and transmission. It allows using different sampling frequency in reception and delivering.

Finally, *Time Control* loop accomplishes an exhaustive time verification, necessary in communication. If there is not information from a client for a time called Keep-alive, the broker must close the connection. In the developed library, this concept is managed as a back account. When the value of a time counter reaches the value of a customer's keep alive time, the client is automatically disconnected. The control loop is executed every 10 ms, even if no customer's message is received. The information is received from the process control loop in a buffer.

Whenever the server receives a message, this Time Control Loop performs. Then, data flow reaches Keep Alive SubVI, which is made up of four main parts. First, the status of the time counter is calculated with the difference between the current time and the time of the last execution of this SubVI. Part 2, is a function in charge of updating the information of the keep-alive time of customers sending a message. The execution of this part of the code depends on the reception of a message. The third part looks for customers whose time count has been finished and return as output the client connection reference. In that case the customer reference is inserted in a disconnect queue. This queue is linked to the process loop, where the connection will be closed. Part 4 execution depends on the existence of the above conditions by a customer.

A. *Graphic user interface and network manager*

The educational system developed in LabVIEW is constituted as an interface to be provided to students. The GUI is helpful to perform the practical training, as a consequence of the created library, which can act as a server too. From this interface, the student can observe the broker redistributing all the received messages and also how it controls the connections of all the customers. The GUI is subdivided into different groups, as shown in Fig 5.

In the part 'A' of Fig. 5, the received and transmitted packets can be observed. As packets are codified in UTF-8, each box corresponds to a byte of information. Part 'B' in Fig. 5 corresponds to general network information. The number of connections and a timer are located. In the middle of the region B, client identifications and *keep alive* information are shown. *Keep alive* is the time the client can spend without sending information to the broker. After this time, the broker must close the connection with this client. *Retain message* information is kept and shown in region B.3. When a client sends a publish package with the retain flag enabled, the broker must save this message-topic combination, and send it when a new subscriber connects to this topic. The part 'C' in Fig. 5 shows important information from each client. TCP/IP connection reference, the client identification (ID) and its *keep alive* time is located in region C.1. Kept data about the client's subscriptions is shown in region C.2, which is composed of the client's topic(s) and their respective Quality of Service. A single client can be subscribed to several topics with various QoS levels. The region C.3 contains information about the 'will message'. This message is optional and is automatically sent when the client turns off the connection with no reason and without receiving a disconnect package. On the contrary, 'will message' is not sent if the broker has decided to disconnect the client because do not comply with the protocol rules. The last region (C.4) kept QoS messages (topic and message), which can´t be deleted before the message acknowledgement, as explained in Section II. When the broker recognizes the message packages, it deletes the QoS package.

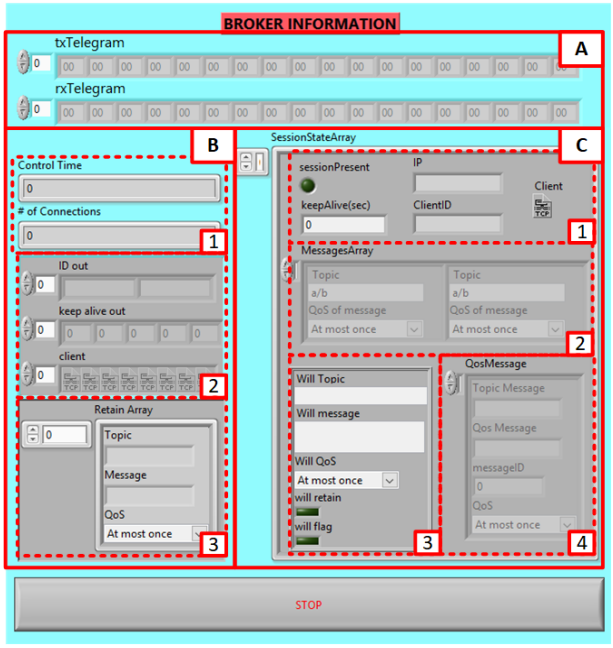


Fig. 5. LabVIEW GUI Broker Information interface

IV. FINAL TESTS

Clients and servers (brokers) are needed to stablish a communication in the MQTT protocol. For this reason, the paper presents a practical lesson in which students can test different platforms for both parts. For the practical session, each student is assigned to a work position. In Fig. 6 is presented the material that will be used. At first, an Arduino Uno WiFi board is connected to a Light Depending Resistor (LDR) and a Negative Temperature Depending (NTC). Furthermore, students are all provided of a Raspberry Pi Board and a Windows Computer, and there is a cRIO system to all of them. The functionality and connection of each of the devices is explained below.

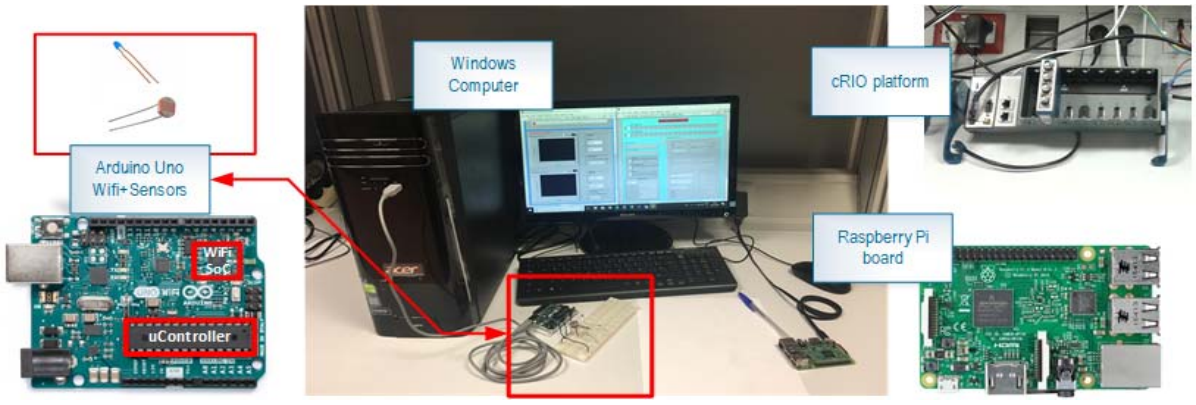


Fig. 6. Overview of the work position.

A. *Clients*

To be in accordance with a WSN philosophy, each client will act as a network node. For each of these clients, the student will send messages to a server whether it is a text message only or data from a sensor-based measurement. The proposed nodes are defined as below.

1) MQTT.fx

Mqtt.fx is a MQTT client written in Java. This program is supported by MacOS, Windows, and Linux. The greatest benefit of using this software is providing a graphic user interface, which allows a simple and intuitive way of introducing the IoT philosophy to students [13]. To set up the application, students just have to define the server's IP address and specify the topic they want to publish data on. Other protocol configurations can also be modified, such as 'keep alive' time, 'clean session' flag and the MQTT version. The objective of this practical work's section is character strings messages with Mqtt.fx program and observe them with the IoT platform shown in Fig 7. Messages published to the topic *IoTplatform/mqttfx* are displayed at the top of Fig. 8.

2) Mosquitto App

Mosquitto is a lightweight open-code implementation of the broker features. In addition, its installation on the PC provides a library for deploying MQTT brokers and clients [14], [15]. In the practical lesson, the students have a guide explaining how to access the program through the Windows command prompt and explaining the controls to use for sending messages between clients. A publisher posts information on two topics called *IoTplatform/test* and *IoTplatform/test2*. Another client subscribed to the above-mentioned topics, displays the published package when it is received.

3) Arduino Uno WiFi

Arduino Uno WiFi [16] board is based on the ATmega328 microcontroller and integrates WiFi co-processor module ESP8266. As a free hardware platform, Arduino offers multiple advantages. For instance, a free software development environment in C language that allows easy programming. Therefore, Arduino is broadly extended in student day life. In addition, there is literature and forums to help the student learning about this platform. These features provide an easy starting environment for IoT applications by means of the specific purpose library Ciao, which could be effortlessly configured and connected to the broker through MQTT protocol.

In the practical lesson, the students are provided with a LDR and NTC. They are connected to Arduino Uno WiFi board via I2C protocol and they are periodically measuring the illuminance and temperature in the room. Furthermore, data is sent to an IoT server as explained in subsection B. Sensors are connected to a 10 kΩ resistance and powered with 5 V provided by the Arduino board, as shown in Fig 8. In addition, a user interface to display the results is shown in Fig 7. The interface allows to modify the parameters required to convert voltage to the value unit of the measurement (ºC or Lux). It also shows a graph of the values collected in the last 20 seconds.

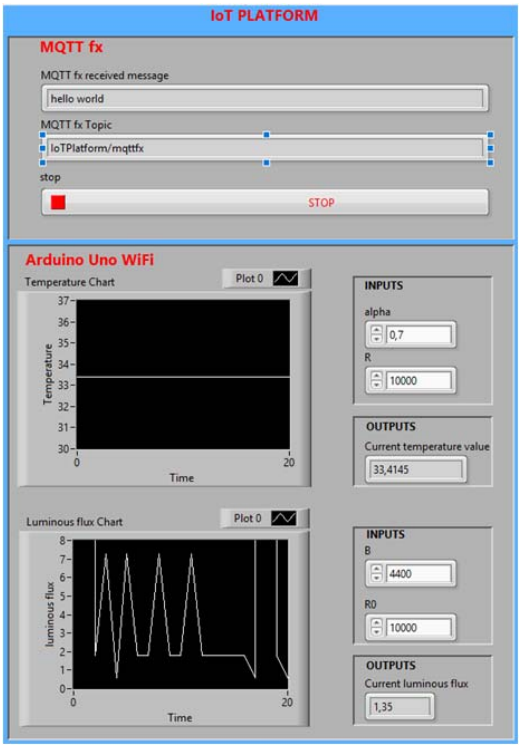
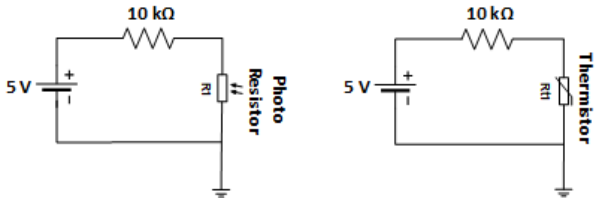


Fig. 7. IoT Educational Platform



(a) (b)

Fig. 8. Sensor connection circuit: (a) LDR sensor; (b) NTC sensor.

B. *Broker*

To show students the inclusion of the IoT in different environments such as domestic area or an industrial one, in this part of the practical lesson, the students test the developed schedule in Section III, in several devices. They have been classified according to increasing level of industrialization. To check the correct performance of the implemented library in the different proposed devices, students are allowed to use either devices explained above as network clients.

1) Windows computer testing

The basic programming of the library has been done on a Windows computer, attempting to isolate the program from the computer hardware. Only the use of port TCP/IP 83 was necessary. The student in the practical training has a computer, therefore, the aim of the lesson is to test the computer as a

server/broker of MQTT. This is accomplished with the LabVIEW libraries provided to the trainee. To check that it works properly, any of the clients described above can be used.

2) Raspberry Pi board

Raspberry Pi is a small, lightweight and high-performance ARM based computer. It is composed of a development environment around the microcontroller [17]. The aim of executing the developed library in LabVIEW into this device is to create a portable, rugged, and a low-cost system. To achieve that, it is needed to install LabVIEW 2014 version. Afterward, students can check the correct operation of the Raspberry Pi acting like a server.

3) CRIO testing

To provide an industrial point of view to the practical work, several cRIO control embedded systems have been used, with different Operating systems, as described in Section II. Introducing Compact-RIO system into the IoT environment offers the advantage of being equipped with a microcontroller, a FPGA and I/O modules. Consequently, in combination with being the network core, cRIO can perform other tasks in parallels, such as data measurement or control system. During the development of the practical lesson, students test the cRIO working as a server.

V. Conclusion

The paper presents an implemented educational platform for MQTT Protocol. As can been explained during the paper, after the creation of the platform different tests were carried out. The program was run with different LabVIEW compatible devices, such as a Windows computer, Raspberry board or high performance embedded control systems such as Compact-RIO. It was successfully achieved, so it can be said that the program has been isolated from the hardware of the computer where the program works.

As a final conclusion, the practical work provides the student with the ability to create a WSN network in a residential and industrial environment. In future works, a studio and integration into the practical work of an IoT cloud, can be performed. In addition, the developed GUI teaches the trendy forms of communication. Students can evaluate each package information and check the different parts of the communication protocol, from the physical layer, through TCP/IP protocol, to the control framework (MQTT). At the end of the subject, master's students complete a satisfaction questionnaire. The IoT platform was evaluated in a positive way by the students.

References

[1] M. Jaradat, M. Jarrah, A. Bousselham, Y. Jararweh, and M. Al-Ayyoub, “The Internet of Energy: Smart Sensor Networks and Big Data Management for Smart Grid,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 56, pp. 592–597, Jan. 2015.

[2] N. Bui, A. P. Castellani, P. Casari, and M. Zorzi, “The internet of energy: A web-enabled smart grid system,” *IEEE Netw.*, vol. 26, no. 4, pp. 39–45, 2012.

[3] F. J. Bellido-outeiriño, J. M. Flores-arias, M. Liñan-reyes, E. J. Palacios-garcía, and J. J. Luna-rodríguez, “Wireless Sensor Network and Stochastic Models for Household Power Management,” in *IEEE Consumer Electronics Society*, 2013, no. Iec 62386, pp. 483–491.

[4] C. Mahapatra, A. Moharana, and V. Leung, “Energy Management in Smart Cities Based on Internet of Things: Peak Demand Reduction and Energy Savings,” *Sensors*, vol. 17, no. 12, p. 2812, 2017.

[5] A. Moreno-Muñoz, J. J. G. De La Rosa, R. J. Real-Calvo, and V. Pallarés, “Embedding measurement in Distribution Automation Systems,” *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, pp. 3722–3727, 2010.

[6] P. Siano, “Demand response and smart grids—A survey,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 30, pp. 461–478, Feb. 2014.

[7] V. Salehi, A. Mohamed, A. Mazloomzadeh, and O. A. Mohammed, “Laboratory-based smart power system, part I: Design and system development,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1394–1404, 2012.

[8] D. Celeita, M. Hernandez, G. Ramos, N. Penafiel, M. Rangel, and J. D. Bernal, “Implementation of an educational real-time platform for relaying automation on smart grids,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 130, pp. 156–166, 2016.

[9] I. M. Moreno-garcia, A. Gil-de-castro, A. Moreno-munoz, V. Pallares-lopez, R. Medina-gracia, and D. Matabuena, “Educational Platform for Reliability Assessment of Power Quality,” in *IEEE Global Engineering Education Conference*, 2018, pp. 1618–1624.

[10] National Instruments, “What is CompactRIO? - National Instruments.” [Online]. Available: http://www.ni.com/compactrio/whatis/. [Accessed: 29-Jan-2018].

[11] V. Gazis *et al.*, “A survey of technologies for the internet of things,” in *IWCMC 2015 - 11th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, 2015, pp. 1090–1095.

[12] International Organization for Standardization, “ISO/IEC 10646:2012 - Information technology -- Universal Coded Character Set (UCS).” [Online]. Available: https://www.iso.org/standard/56921.html. [Accessed: 27-Feb-2018].

[13] Jens Deters, “Welcome to the home of MQTT.fx.” [Online]. Available: http://mqttfx.jensd.de/. [Accessed: 18-Feb-2018].

[14] F. J. Bellido-Outeiriño, J. M. Flores-Arias, E. J. Palacios-Garcia, V. Pallares-Lopez, and D. Matabuena-Gomez-Limon, “M2M Home Data Interoperable Management System Based on MQTT,” *IEEE International Conference on Consumers Electronics (ICCE)*, Berlin, pp. 2–4, 2017.

[15] Eclipse, “Eclipse Mosquitto.” [Online]. Available: https://mosquitto.org/. [Accessed: 18-Feb-2018].

[16] Arduino.cc, “Arduino Uno WiFi.” [Online]. Available: https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-wifi. [Accessed: 29-Jan-2018].

[17] Raspberry Pi Foundation, “Raspberry Pi - Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi.” [Online]. Available: https://www.raspberrypi.org/. [Accessed: 18-Feb-2018].

Análisis de resultados de los estudiantes en base a datos de conexión al LMS

Estudio de caso: máster on line basado en tareas

Antonio Menacho
DIEECTQAI, ETSII
UNED
Madrid, Spain
amenachov@gmail.com

Manuel Castro
DIEECTQAI, ETSII
UNED
Madrid, Spain
mcastro@ieec.uned.es

Clara Pérez-Molina
DIEECTQAI, ETSII
UNED
Madrid, Spain
clarapm@ieec.uned.es

José M. Benítez
DECSAI
Universidad de Granada
Granada, Spain
J.M.Benitez@decsai.ugr.es

Pedro Plaza
DIEECTQAI, ETSII
UNED
Madrid, Spain
pedro.plaza@hotmail.com

Elio San Cristóbal
DIEECTQAI, ETSII
UNED
Madrid, Spain
elio@ieec.uned.es

***Abstract*—En los últimos tiempos la minería de datos educativa (EDM) ha cobrado gran importancia por las posibilidades que ofrece para la mejora de los procesos educativos. Uno de sus objetivos es predecir los resultados obtenidos por los alumnos.**

Por otro lado, el comportamiento de los alumnos a la hora de conectarse a la plataforma de aprendizaje (LMS) varía en función de la metodología educativa utilizada.

El objetivo de este estudio es analizar los resultados obtenidos por los estudiantes en función de sus conexiones al LMS durante la realización de un máster impartido a distancia de forma online que utiliza la metodología educativa basada en tareas (*task-based*).

De este trabajo se desprende que el número de conexiones al LMS puede ser utilizado para detectar alumnos que podrían abandonar la asignatura.

Keywords—Educational Data Mining, task-based, eLearning.

I. INTRODUCCIÓN

La minería de datos aplicada a la educación (*Educational Data Mining*, EDM) está siendo utilizada como una herramienta eficaz para la mejora de los procesos educativos.

Uno de los objetivos de la minería de datos educativa es tratar de predecir los resultados de los estudiantes en base a la información proporcionada por el propio LMS. Para ello se ha recurrido, por ejemplo, a algoritmos basados en la participación en foros de discusión [1] o al tiempo dedicado en cada una de las actividades realizadas en cursos online [2].

Por otro lado, el comportamiento de los alumnos a la hora de conectarse a la plataforma de aprendizaje (*Learning Management System*, LMS) es diferente dependiendo de la metodología educativa utilizada [3]. En este caso de estudio, donde se ha utilizado la metodología basada en tareas, al estudiante se le facilita toda la información y las tareas a realizar al inicio del curso, por lo que no necesita conectarse al LMS con tanta frecuencia como con otras metodologías educativas.

En este estudio se va a analizar las posibles relaciones entre las calificaciones obtenidas por los alumnos, las conexiones que han realizado al LMS y la duración de estas conexiones durante la realización de un máster impartido a distancia, de forma online, en el que se utiliza la metodología educativa basada en tareas (*task-based*).

II. CASO DE ESTUDIO

La UNED es la Universidad española con mayor número de estudiantes y una de las primeras universidades que adoptó el uso de internet en su proceso educativo.

Como parte de su oferta educativa, la UNED imparte, de forma conjunta con la Universidad Paisii Hilendarski de Plovdiv, Bulgaria, el *Master in Information and Communication Electronic Systems*, el cual es un máster oficial acreditado por la ANECA (Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación) y que consta de 13 asignaturas, entre obligatorias y optativas, de las cuales los alumnos tienen que superar 11 (8 obligatorias, 2 optativas y la tesis final de máster).

Este máster se imparte a distancia de manera online, utilizando la metodología educativa basada en tareas (*task-*

based). Toda la información, tareas a realizar, etc., está a disposición del alumno a principio del curso, salvo en un número limitado de asignaturas, en las que el material se proporciona de acuerdo con un calendario preestablecido. Es por ello que los alumnos no necesitan conectarse al LMS con tanta frecuencia como en estudios en los que se utilizan otras metodologías educativas.

Como LMS, la UNED utiliza la plataforma aLF (**a**prende, co**L**abora, **F**orma), que ha sido desarrollada por Innova, grupo de I+D dentro de la Sección de Innovación de la UNED, a partir de la plataforma de software libre OpenACS y dotLRN, del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT). aLF proporciona datos relativos a las sesiones de usuario en cada asignatura, en concreto la fecha y hora de inicio de la conexión y su duración.

En este estudio se han analizado los datos obtenidos durante el curso 2014-15 relativos a los 33 alumnos matriculados en el máster. Hay que señalar que la mayoría de los alumnos de esta Universidad estudian a tiempo parcial, por lo que es habitual que necesiten más de un curso académico para finalizar los estudios. En concreto, los alumnos se han enrolado en un total de 201 matrículas en las diferentes asignaturas, lo que supone una media de 6,09 asignaturas por alumno.

El número total de conexiones (sesiones) al LMS realizadas por el conjunto de los estudiantes es de 7.133, número muy inferior a las que se producen con otras metodologías educativas [2], [4].

Los foros disponibles en cada asignatura son configurados por el profesorado, existiendo en todas ellas, al menos, dos foros: general y de estudiantes. Además, cada profesor puede añadir tantos foros como considere adecuado [5]: un foro por cada módulo de la asignatura, evaluación, noticias, etc.

En total los estudiantes publicaron 373 mensajes en los diferentes foros de las asignaturas, un número solo algo superior al número de mensajes publicados por los profesores. Esto daría un promedio de 1,85 mensajes por alumno y asignatura, dándose el caso de alumnos que no han publicado ningún mensaje en foros. Dado que este número de mensajes resulta muy reducido, en este caso podrían no ser de aplicación las técnicas basadas en la participación en los foros de discusión para poder establecer relación con los resultados obtenidos.

Además, los alumnos pueden elegir recibir un correo electrónico cada vez que se publique un mensaje en cualquiera de los foros de las asignaturas en las que esté matriculado. Ello implica que pueden conocer los mensajes publicados en dichos foros sin tener que acceder a la plataforma.

Por otra parte, la plataforma utilizada por la UNED no permite realizar un seguimiento de las actividades realizadas por el alumno durante cada sesión (conexión) ni del tiempo dedicado a cada una de estas actividades, por lo que tampoco se podrían aplicar técnicas que utilicen esta información para predecir resultados académicos.

Desde el punto de vista del proceso de aprendizaje, que el alumno se conecte al LMS no indica que esté dedicado al estudio, pero sí indicaría cierto interés por el aprendizaje. Del mismo modo, el hecho de que el alumno se mantenga conectado no quiere decir que esté estudiando, ya que podría estar realizando otra tarea al mismo tiempo, sin embargo, es más probable que el alumno esté involucrado en el proceso de aprendizaje mientras esté conectado.

El número de conexiones realizadas a cada asignatura y la duración de estas depende, por un lado, del comportamiento del propio alumno en sí y, por otro, de la actividad en la propia asignatura, que puede hacer que algunos alumnos se sientan motivados a acceder con más frecuencia. Así, se han encontrado alumnos con un número reducido de conexiones y alguno con un promedio de 3 conexiones diarias durante el curso. Además, existen asignaturas en las que la actividad dentro del LMS es más reducida que en otras.

Por todo ello, se han analizado los resultados desde dos puntos de vista diferentes: cada alumno con respecto a las asignaturas en que está matriculado y el conjunto de alumnos matriculados en cada asignatura.

Como se ha mencionado anteriormente, el análisis se realizará utilizando los datos suministrados por el LMS: fecha y hora de inicio de la conexión y duración de ésta y sus posibles relaciones con las calificaciones obtenidas. A partir de estos datos se obtendrá la evolución temporal y el número total de conexiones a cada asignatura, así como los valores máximos y mínimos de todos estos parámetros.

III. Análisis por alumno

Los resultados generales obtenidos por los alumnos son los reflejados en la tabla I.

El dato que más resalta es el elevado número de alumnos que no se ha presentado a examen en las diferentes asignaturas (36,32%). Este hecho podría estar relacionado con la carga de trabajo que representa el máster para los alumnos, teniendo en cuenta que, en su mayoría, son alumnos a tiempo parcial debido a que trabajan al tiempo que estudian.

Tabla I: Resultados generales obtenidos por los alumnos

Resultados generales de los alumnos. Curso 2014-15		
Calificación	***Nº alumnos***	***Porcentaje***
Matrícula de honor	3	1,49%
Sobresaliente	56	27,86%
Notable	44	21,89%
Aprobado	24	11,94%
Suspenso	1	0,5%
No presentado	73	36,32%
Tasa de éxito		
Resultado	***Nº alumnos***	***Porcentaje***
Apto	127	63,18%
No apto	74	36,82%

La tasa de éxito, es decir, la tasa de alumnos que han superado la asignatura, es del 63,18%, correspondiendo solo el

0,5% a suspensos y el resto a alumnos que no se han presentado a examen.

Este dato implicaría que los alumnos se presentan a examen solo cuando consideran que tienen suficientemente dominada la materia como para obtener éxito.

Para realizar un análisis más individualizado se van a comparar los datos disponibles para todas las asignaturas en las que cada alumno se ha matriculado durante el curso. Para ello se va a considerar como valores máximos o mínimos aquellos que se obtengan para las distintas asignaturas, aunque se repitan. Por ejemplo, es habitual que un alumno, cuando se conecta al LMS, acceda a las páginas relativas a todas las asignaturas en las que está matriculado durante ese cuatrimestre, por lo que el número de conexiones a todas ellas puede ser el mismo y, por tanto, repetirse. Del mismo modo ocurre con las calificaciones, si bien no con los valores numéricos, sí con las asignaturas en las que el alumno ha decidido no presentarse, englobadas como nota mínima (16 alumnos no se han presentado a examen en más de una de las asignaturas en las que estaba matriculado).

Al analizar la relación entre el número de conexiones, la duración de éstas y los resultados académicos obtenidos para todos los alumnos se observa, como cabría esperar, una gran disparidad de resultados, con un elevado número de variantes. Esto llevaría a confirmar que no existe una correlación directa entre estas variables, es decir, un mayor número de conexiones o de tiempo de conexión no implican una mayor calificación.

Como ejemplo de la divergencia en los resultados se muestran en la tabla II los datos correspondientes al alumno 29, el cual muestra el caso más extremo de esta disparidad, habiendo obtenido la mejor de sus calificaciones en la asignatura en la que realizó menos conexiones al LMS, con menor tiempo total de duración de éstas, y la peor calificación en la asignatura en la que tuvo valores máximos de número de conexiones y duración de las mismas, lo que confirma esta falta de correlación entre los parámetros analizados.

TABLA II. Datos relativos al alumno 29

Datos alumno 29			
Asignatura	***Nº conexiones***	***Duración total (min)***	***Nota***
IRTC	117	1824,42	7
ICTRECS	96	1273,25	10
MPT	67	742,92	7,7
PS	58	568,42	10

Como ejemplo minoritario, en la tabla III se muestran los datos del alumno 21, que ha obtenido la mejor calificación en la asignatura EICS, donde ha marcado valores máximos de conexiones al LMS y duración total de las mismas, al tiempo que los valores mínimos de conexiones y duración coinciden con asignaturas en las que no se ha presentado a examen.

Analizando en el conjunto de alumnos la relación entre el número de conexiones al LMS (C), la duración de estas conexiones (T) y las calificaciones obtenidos por los estudiantes (N) se obtienen los resultados mostrados en la tabla IV.

Tabla III: Datos relativos al alumno 21

Datos alumno 21			
Asignatura	***Nº conexiones***	***Duración total (min)***	***Nota***
IITS	32	867,83	8,6
IRTC	23	637,33	5,2
EICS	32	1078,75	10
MPT	15	335,75	NP
CM	12	293,75	NP
WC	21	451,58	5

TABLA IV. Coincidencias entre valores máximos y mínimos de C, T y N

Coincidencias entre valores de C, T y N / Alumnos	
Caso	***Porcentaje***
Coincidencia máximos de C, T y N	18,18 %
Coincidencia máximos solo de C y N	3,03 %
Coincidencia máximos solo de T y N	12,12 %
Coincidencia mínimos de C, T y N	60,61 %
Coincidencia mínimos solo de C y N	3,03 %
Coincidencia mínimos solo de T y N	3,03 %

Es decir, no se obtienen relaciones relevantes entre las coincidencias de los valores máximos del número de conexiones, la duración de estas conexiones y la calificación obtenida (18,18 %). Igualmente ocurre con las coincidencias entre los valores máximos de calificación obtenida y el número de conexiones (3,03 %) o la duración total de las conexiones y la calificación (12,12 %). Del mismo modo, las coincidencias entre valores mínimos de calificaciones y número de conexiones (3,03 %) o duración de estas (3,03 %) presentan valores irrelevantes.

Sin embargo, sí se obtiene un valor relevante para el caso de valores mínimos de todos los parámetros, es decir, en el 60,61 % de los casos, los alumnos han obtenido los peores resultados en aquellas asignaturas en las que realizaron un menor número de conexiones al LMS y, además, con menor tiempo de conexión.

Cabe igualmente resaltar que en el 40,91% de los casos, los valores mínimos de número de conexiones y duración de las mismas coinciden con "no presentado" a examen. Es decir, que valores mínimos de los parámetros considerados podrían ser estimados para predecir el posible abandono de la asignatura. De hecho, solo en un 10% de los alumnos que no se han presentado a examen en alguna asignatura no coinciden en la misma los valores mínimos de estos parámetros.

IV. ANÁLISIS POR ASIGNATURA

En la tabla V pueden observarse las conexiones totales a cada asignatura y el tiempo total de duración de las mismas para el conjunto de los alumnos matriculados en ellas, así como los valores promedio por alumno matriculado.

Igualmente, los datos de conexiones y duración total de las mismas son muy diferentes entre asignaturas, aunque se observa una relación directa entre el número de conexiones y la duración de estas. Esta relación no es tan directa cuando se obtienen los valores promedio en función del número de alumnos matriculados en cada asignatura, apreciándose cómo las asignaturas con mayor número de conexiones siguen teniendo valores promedio elevados, pero aparece alguna asignatura con valores promedio mayores. En concreto la asignatura EICS tiene valores máximos en todos los parámetros analizados, mientras que las asignaturas IT y CM mejoran en sus valores promedio con respecto a los valores totales de C y T.

Tabla V: Número de conexiones (C), duración total (T) y valores promedio por alumno matriculado en cada asignatura de estos valores.

Datos de conexiones, duración y promedios por asignatura. Curso 2014-15				
Asignatura	***C***	***T***	***C/alumno***	***T/alumno***
IITS	2.064	23.474,86	73,71	838,39
IRTC	1.183	13.493,8	65,72	749,65
IT	1.422	15.194,1	94,80	1012,94
EICS	2.016	24.654,3	100,8	1.232,71
ICTRECS	1.001	16.847,57	58,88	991,03
FMT	153	1.842,1	19,13	230,26
MPT	1.198	10.760,35	47,92	430,41
MMICS	1.092	9.971,6	60,67	553,98
PS	310	2,658,09	38,75	332,26
ME	377	5.637,9	41,89	626,43
SMC	524	4.199,9	65,50	524,99
CM	843	7.102,7	93,67	789,19
WC	902	8.295,3	50,11	460,85

Tabla VI: Promedios de calificaciones obtenidas en las distintas asignaturas considerando los alumnos no presentados y solo los presentados

Datos de calificaciones por asignatura. Curso 2014-15		
Asignatura	***N promedio (NP)***	***N promedio***
IITS	6,60	8,4
IRTC	4,08	6,12
IT	6,08	8,29
EICS	6,33	9,04
ICTRECS	4,47	8,44
FMT	1,25	10
MPT	3,40	7,73
MMICS	5,57	8,36
PS	4,31	8,62
ME	7,22	9,29
SMC	8,40	9,6
CM	6,5	9,75
WC	4,5	7,36

En la tabla VI se muestran las calificaciones promedio obtenidas por los alumnos en las distintas asignaturas, considerando, por una parte, las calificaciones promedio incluyendo los alumnos no presentados (N promedio (NP), calificación 0) y por otra, considerando solo las calificaciones promedio de los alumnos presentados a examen (N promedio).

Por un lado, se aprecia que, considerando el total de los alumnos incluyendo los no presentados a examen, los valores promedio bajan en aquellas asignaturas en las que hay varios alumnos en estas condiciones, por lo que este dato distorsiona en demasía los resultados. Por otra parte, considerando solo los alumnos presentados a examen, quedarían incluidos los valores de C y T de los alumnos eliminados. En este caso la distorsión de los resultados es menor, pero también resulta evidente.

Para evitar estas distorsiones, en la tabla VII se muestran los valores de C, T y sus promedios por alumno matriculado eliminando todos los datos relativos a los alumnos que no se han presentado a examen.

Tabla VII: Número de conexiones (C), duración total (T) y valores promedio por alumno matriculado en cada asignatura de estos valores sin los datos relativos a los alumnos no presentados a examen.

Datos de conexiones, duración y promedios por asignatura sin alumnos no presentados a examen. Curso 2014-15				
Asignatura	***C***	***T***	***C/alumno***	***T/alumno***
IITS	2.005	22.620,33	91,14	1.028,20
IRTC	1.089	12.376,6	90,75	1.031,38
IT	1.349	13.505,4	122,64	1.227,77
EICS	1.905	22.608,7	136,07	1.614,91
ICTRECS	792	13.549,2	88	1.505,47
FMT	26	107,33	26	107,33
MPT	959	7.498,27	87,18	681,66
MMICS	1.045	9.364,3	87,08	780,36
PS	277	2.156,9	69,25	539,23
ME	373	5.594,3	53,29	799,18
SMC	524	4.199,9	74,86	599,99
CM	810	6.478,82	115,71	925,55
WC	832	6.492,3	75,64	631,12

Comparando ahora los resultados promedio obtenidos solo por los alumnos presentados a examen de la tabla VI con los datos de la tabla VII, se observa que tampoco existe una relación clara entre los promedios de conexiones y duración de estas con la nota promedio obtenida. La asignatura FMT es una excepción debido a que solo un alumno se ha presentado a examen en esta asignatura.

De hecho, se observa que en algunas asignaturas los alumnos han obtenido mejores resultados con un número mucho menor de conexiones y duración de estas que en otras asignaturas.

Realizando un análisis individualizado similar al apartado anterior para cada asignatura sobre las coincidencias entre los valores máximos y mínimos de los parámetros disponibles se obtiene los resultados de la tabla VIII.

En ella se observa que aumenta ligeramente la coincidencia entre valores máximos de estos parámetros, lo que indicaría que, dentro de las asignaturas, mejoran los resultados de los alumnos que más se han conectado al LMS y han estado conectados un tiempo mayor.

TABLA VIII. Coincidencias entre valores máximos y mínimos de C, T y N por asignaturas

Coincidencias entre valores de C, T y N / Asignaturas	
Caso	***Porcentaje***
Coincidencia máximos de C, T y N	23,08 %
Coincidencia máximos solo de C y N	0 %
Coincidencia máximos solo de T y N	0 %
Coincidencia mínimos de C, T y N	53,85 %
Coincidencia mínimos solo de C y N	38,46 %
Coincidencia mínimos solo de T y N	30,77 %

Por el contrario, la coincidencia de valores mínimos de los parámetros con calificaciones inferiores se reduce ligeramente. No obstante, hay que resaltar que el 100% de estas coincidencias aparecen con alumnos que no se han presentado a examen.

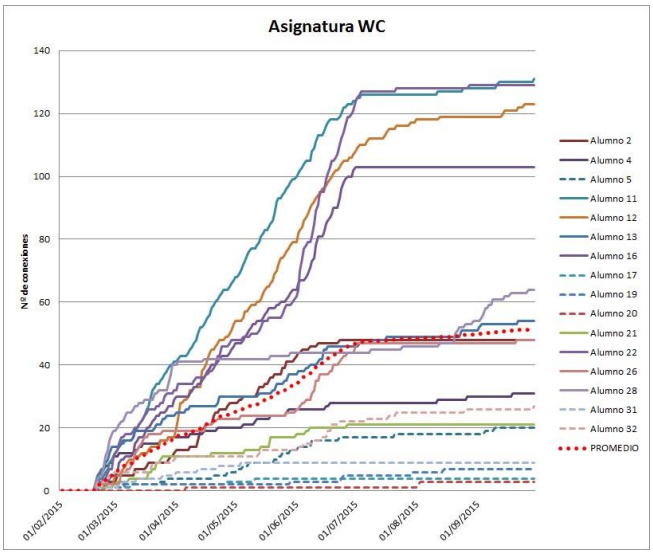


Fig. 1: Evolución temporal a lo largo del curso de las conexiones de los alumnos matriculados en la asignatura WC.

Posteriormente se ha analizado la evolución temporal de las conexiones de todos los alumnos matriculados en cada una de las asignaturas. De este modo se podrá comparar la evolución entre el número de conexiones de aquellos alumnos que han superado la asignatura y aquellos que no la han superado.

Como ejemplo, en la figura 1 se muestra la evolución de las conexiones de los alumnos matriculados en la asignatura WC, en la que con línea discontinua se indican los alumnos que no han superado la asignatura y con línea de puntos de color rojo el valor promedio de la evolución temporal de las conexiones del conjunto de alumnos matriculados en la asignatura.

En este caso se observa que el número de conexiones más bajas coinciden con los alumnos que no han superado la asignatura, estando todas ellas en todo momento por debajo del valor promedio del conjunto de alumnos. Se observa, además, que uno de los alumnos ha finalizado el curso con un número de conexiones inferior a otro que no ha superado la asignatura, si bien el primero ha obtenido una calificación de 5.

Igualmente se observa cómo el número de conexiones al LMS sigue aumentando a partir de la convocatoria de junio, debido a que 5 de los alumnos han superado la asignatura en la convocatoria de septiembre.

En la figura 2 se muestra la evolución temporal de las conexiones de los alumnos de la asignatura EICS. En este caso se aprecia cómo uno de los alumnos que no ha superado la asignatura se ha conectado al LMS un número de veces mayor que otros dos alumnos que sí la han superado. En este caso se trata de un alumno que durante el primer cuatrimestre realizó un número muy elevado de conexiones, en concreto esta fue la asignatura en la que más veces se conectó, lo que supondría que el alumno ha mostrado interés en seguir la asignatura, pero finalmente decidió no presentarse a examen. En cualquier caso, el número de conexiones de este alumno se mantiene por debajo del valor promedio del conjunto de alumnos.

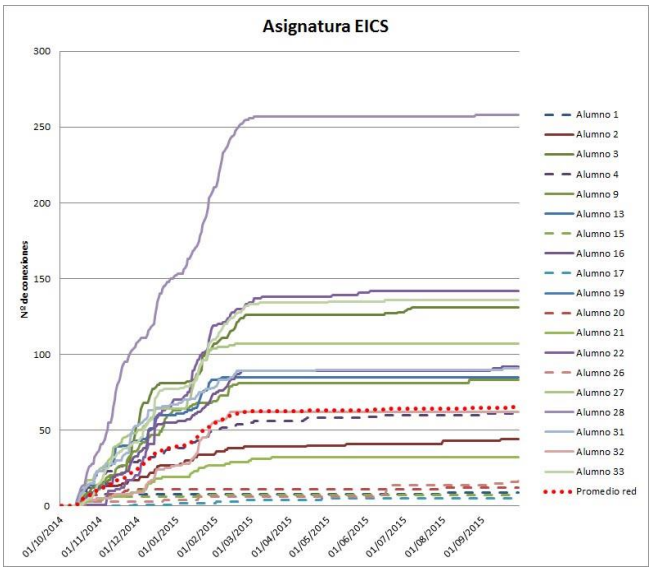


Fig. 2: Evolución temporal de las conexiones de los alumnos de la asignatura EICS donde el valor promedio se ha calculado sin considerar al alumno 23.

En el caso de la figura 2, el valor promedio se ha calculado sin considerar las conexiones del alumno 23. Este alumno ha presentado un número de conexiones muy elevado (promedio de 3 conexiones diarias) que distorsiona el valor promedio.

Se observa que el resto de alumnos que no han superado la asignatura igualmente presentan un número de conexiones muy reducido. Del mismo modo, en el caso de estos alumnos, el número de conexiones se mantiene prácticamente durante todo el curso por debajo del promedio de conexiones.

En el resto de asignaturas se obtienen resultados similares, en concreto, de las 201 matrículas en las diferentes asignaturas, ha habido 74 casos en los que el alumno o bien no ha superado la asignatura o no se ha presentado a examen. De estos 74 casos, solo en dos de ellos el número de conexiones al final del curso es superior al promedio de conexiones de todos los alumnos matriculados en la asignatura.

Podría decirse, por tanto, que la evolución temporal del número de conexiones al LMS pudiera utilizarse para detectar alumnos que podrían abandonar la asignatura, es decir, no presentarse a examen.

Dado que entre el inicio de cada mitad del curso y la fecha de examen transcurren aproximadamente cuatro meses, lo interesante sería realizar una detección de estos casos con suficiente tiempo para revertir la situación o, al menos, poder contrastar con el alumno qué clase de problemas está teniendo con la asignatura.

De la distribución temporal de las conexiones se obtiene que, transcurrido el primer mes del cuatrimestre, solo en cinco casos (exceptuando la asignatura FMT, en la que el índice de no presentados es muy elevado) el número de conexiones de estudiantes que no han superado la asignatura es superior al promedio de conexiones de todos los alumnos en esa fecha. Si bien, hay un gran número de alumnos que presentan conexiones por debajo del promedio que sí la han superado, por lo que, transcurrido un mes, se necesitaría algún parámetro adicional para detectar el abandono de la asignatura por parte de los alumnos.

V. Conclusiones

Del estudio realizado se desprende que no se aprecia una correlación directa entre el número de conexiones realizadas al LMS y el tiempo total de duración de las mismas con las calificaciones obtenidas por los alumnos.

En cambio, si se advierte que, en el 60% de los casos, la coincidencia de los números mínimos de estos parámetros coincide con las peores calificaciones obtenidas por los alumnos.

De la evolución temporal de las conexiones realizadas por los alumnos al LMS se deduce que, en la mayoría de los casos, los alumnos que no han superado la asignatura o no se han presentado a examen o presentan un número de conexiones menor que el resto de alumnos.

Transcurrido un mes desde el inicio del cuatrimestre, solo en cinco casos (6,75%) el número de conexiones de alumnos que no han superado la asignatura es superior al promedio de conexiones de todos los alumnos para esa fecha. Por lo tanto, en el 93,24% de los casos los alumnos no presentados a examen muestran un número de conexiones por debajo del promedio de conexiones del total de los alumnos, si bien, también hay alumnos que han superado la asignatura que presentan un número de conexiones inferior al promedio.

Conforme avanza el cuatrimestre, el número de alumnos con un número de conexiones inferiores al promedio de los alumnos matriculados en cada asignatura prácticamente se reduce a los que no se presentan a examen, con algunas excepciones. Por este motivo, el número de conexiones al LMS podría ser estimado como parámetro para detectar alumnos que pudieran abandonar la asignatura.

Se obtienen resultados similares para la evolución temporal del tiempo de conexión al LMS.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo de la Escuela Internacional de Doctorado de la UNED y del personal del Máster en Sistemas Electrónicos de Información y Comunicación.

Asimismo, desean agradecer a la Sra. Lucia Arias, de la Escuela de Ingeniería Industrial de la UNED y al Sr. Alberto Pesquera, del Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico de la UNED (CiNDETEC) su ayuda para la obtención de datos de los alumnos.

Referencias

[1] Romero, Cristóbal & López, Manuel-Ignacio & Luna, José María & Ventura, Sebastián. (2013). Predicting students' final performance from participation in on-line discussion forums. Computer&Education. 68. 458-472. 10.1016/j.compedu.2013.06.009.

[2] Carver, L., Muhkerjee, K., Lucio,R. "Correlation between grades earned and time in online courses." Online Learning 21, no. 4 (2017).

[3] Menacho, A., Castro, M., Perez-Molina, C., "Mining LMS students' data on online task-based master degree studies", EDUCON 2018 conference, in press.

[4] Martínez, D. D. (2017). Profesorado en formación y ambientes educativos virtuales. Campus Virtuales, 6(2), 69-78. (www.revistacampusvirtuales.es).

[5] Webb, Eileen, Alan Jones, Philip Barker, and Paul van Schaik. "Using e-Learning Dialogues in Higher Education." Innovations in Education and Teaching International 41, no. 1 (02/01, 2004): 93-103.

SESIÓN I.B: ELECTRÓNICA ANALÓGICA 1

An electroacoustical testbench: characterizing an audio line

Pablo Garrido Sánchez
GranaSAT Aerospace Group
University of Granada
Granada, Spain
pablogs@ugr.es

Andrés Roldán Aranda
Electronics Department
University of Granada
Granada, Spain
amroldan@ugr.es

***Abstract*— A plug-and-play audio testbench is a really useful tool for an electroacoustical emissions laboratory. This paper proposes a suite of tools and a set of configurations designed for obtaining a complete view of the most important audio and electroacoustical figures of merit. The main goal of this testbench is to provide a low-cost electroacoustical characterization system following a black box approach, easy to use in investigation research and educational environments. Furthermore, this development aims to provide a guided set of exercises for the students of the Acoustics Master of the University of Granada to be able to actually work with modern audio electronic deployments like balanced audio lines or digital signal processing toolboxes**

Keywords*— *Electroacoustical, testbench, audio measurements

I. INTRODUCTION

The current availability of high-end audio devices and their affordable prices has made possible the use of a powerful sound interface to deal with reliable acquisition of low frequency audio signals. Using a previously characterized interface, a suite of automated tools is developed. This suite is able to determine with certain accuracy and precision the major figures of merit of audio devices under test.

With these tools, it is possible to profile the response of an audio device and dive into the details of how they perform along the main audio goals.

In addition, the retrieved measurements are a great entry point for understanding the operation of an electroacoustic or acoustic device or even an audio line.

A. Audio figures of merit

Measuring and profiling is the main purpose of this development, but first and foremost, there are some definitions required in order to clarify and expose our scope.

First of all, a "black box" device which has (generally) two audio inputs and two audio outputs and some functionality has to be defined. The audio line will be manipulated by this device in a certain manner, this is the functionality.

Due to side effects, the audio signal could be modified in not expected ways. The measurement of these effects determines the quality of the device under test, henceforth DUT.

Thereupon, the sought-after figures of merit are [1]:

- Frequency response: the ratio between the input signal amplitude and the output signal amplitude for a certain frequency, usually expressed in decibels.
- THD or Total Harmonic Distortion: the ratio between the output energy of a single frequency and the energy in its harmonics.
- Cross Talk: the interference between independent input channels reflected in output channels.
- SINAD or Signal to Noise and Distortion ratio: the ratio between the energy of a signal and its harmonics plus the noise floor, usually expressed in decibels relative to carrier.
- SNR or Signal to Noise Ratio: the ratio between the energy of a signal and the floor of noise, excluding the harmonics.

II. METHODS

Before any measurements are done is necessary to determine the limitations of the measurement equipment. After this procedure, if the restrictions are wide enough, the developed tools can rely on a hardware structure like the one shown in figure 1.

Once the hardware is in place, fine-tunning the whole testbench (cables, connectors, etc) was necessary in order to make the measurements reliable.

Finally, by connecting the DUT is possible to run the software testbench and obtain the measurement results.

A. Characterizing the measurement equipment

Confining the valid scope of the testbench measurements is allowed by knowing the measurement equipment boundaries and limitations.

Using the configuration shown in the figure 2, a bounded reference of these figures of merit was determined, as well as an accurate approach of the audio spectrum performance [2].

An HP 5903B Audio Analyzer as calibrated reference [3] was used to measure the flatness of the Behringer UMC404HD sound card frequency response, the signal to noise and distortion ratio, the crosstalk between channels, and the input and output balanced impedance in its XLR sockets.



Fig. 1. Block diagram of the electroacoustical testbench

Theoretically, the Behringer UMC404HD sound card is able to sample the audio signal at 192 kHz. Signals with up to 92 kHz spectrum components can be sampled with this sample rate.

In terms of sample depth, the sound card is able to register up to 24 bits precision in each sample. Taking the digital signal theory into account [4] the maximum SNR achieved with this precision is

$$SNR = 20 \times \log_{10}\left(2^{24\ bits}\sqrt{\frac{2}{3}}\right) = 142.7\ \text{dB} \quad (1)$$

Note that -142.7 dBFS is the quantization noise floor and 142.7 dB is the relation between the maximum representable signal amplitude (0 dBFS) and the noise floor.

The measurements were carried out with a low output impedance (600 Ω) and high input impedance (100 kΩ at the end of the line). Additionally, a 30 kHz low pass filter was activated in order to get measurements accurate in terms of audio performance.



Fig. 2. Profiling the measurement equipment Behringer UMC404HD using a calibrated reference: HP 5903B Audio Analyzer.

Once the characterization is completed, the Behringer UMC404HD sound card is ready to be used in the successive procedures. Having defined boundaries of its capabilities will determine the validity of the measurements.

B. *The hardware testbench*

The hardware deployment of the testbench is mainly based on the Behringer UMC404HD sound card. However, some audio and communication cables are used in order to connect the sound card to the DUT and to the main computer, respectively.

This testbench is able to perform a wide frequency band analysis to a certain audio device using noise-robust XLR balanced cables: an audio differential signaling standard.

Two pairs of "the sssnake SM10RD" cables are used to connect the Behringer sound card with the DUT. Two of them for the right channel (from sound card output to DUT input and from DUT output to sound card input) and the other two for the left. Each of these cables have an XLR male and female connectors on its ends.

An USB A to B cable is used to power and communicate the Behringer sound card.

C. *The software testbench*

The main operation of the testbench consists in playing an ordered stream of pre-generated sounds and recording the output of the DUT.

A deep analysis of the DUT behavior is possible having it response to certain audio samples with characterized attributes.

The audio samples that the testbench fires are:

D1. 5 seconds -3 dBFS stereo pure tones at various frequencies ranging from 10 Hz to 100 kHz logarithmically distributed.

D2. 5 seconds 0 dBFS stereo pure tones at various frequencies ranging from 10 Hz to 100 kHz logarithmically distributed.

D3. 5 seconds 0 dBFS mono pure tones at 1 kHz, 10 kHz and 80 kHz in each channel.

D4. -20 to 0 dBFS signals with linear or logarithmic rising pattern at frequencies ranging from 10 Hz to 25 kHz logarithmically distributed.

D5. 20 seconds and -3 dBFS white noise.

D6. 20 seconds and -3 dBFS pink noise.

D7. 20 seconds of silence to sense the noise floor.

The audio samples are crafted, played and recorded using MATLAB R2017a. The audio input and outputs are recorded as a sample array with a certain sample rate.

Some numerical procedures are executed after the play-record phase has ended:

Using data from D1, frequency response is calculated isolating the energy of the output at certain frequency and dividing it by the input energy at the same frequency.

The THD is calculated using MATLAB's *thd()* function for each recorded sample in D2. Ten harmonics are considered in the calculation.

The SNR is calculated using MATLAB's *snr()* function for each recorded sample in D2. As said in the documentation: this value is determined using a modified periodogram of the same

length as the recorded sample. The modified periodogram uses a Kaiser window with β = 38. The result excludes the power of the first six harmonics, including the fundamental [5].

The SINAD is calculated using MATLAB's *sinad()* function for each recorded sample in D2. This function returns the signal to noise plus distortion in dBc. The measurement is determined using a modified window periodogram of the same length as the recorded signal. The periodogram uses a Kaiser window with β = 38 [6].

Using the recorded data in D3 crosstalk is determined. The monophonic signal allows comparing the energy at given frequency in the driven channel and the same energy in the undriven channel.

Using the rising amplitude patterns fired in D4 analyzing non-linear time effects is possible. These effects, such as compression knee, "pumping" effect or attack and release times.

The results of these tests are exposed in various ways: a MATLAB object ready for postprocessing, an Excel Spreadsheet for reporting purposes, and graphs for easy visual evaluation.

D. Electrical line calibration

In order to get a physical relation between the digital signal generated and the audio line signal some measures should be done before test starts.

The RMS value of the signal driven by the output on an open line will establish the relation between the output digital full scope and the electrical signal.

Connecting the sound card output to the main line input and measuring the RMS value on the connected audio line will give a relation between the input digital full scope and the electrical signal.

III. Results

A. The Behringer UMC404HD calibration

The HP 5903B Audio Analyzer measurements over the Behringer UMC404HD sound card exposed a 50 kHz flat frequency response in both playing and recording.

As shown in figure 3, the selected audio card is capable of perform a SINAD greater than 40 dB and a THD lower of -40 dB on the desired frequency band.

Likewise, a -5 dBu input signal (0.6 Vrms approximately) generates a flat -29 dBFS frequency response in the digital scope of the testbench. This record has a SNR and a SINAD of 50 dB and THD lower than -50 dB, as represented in figure 4.

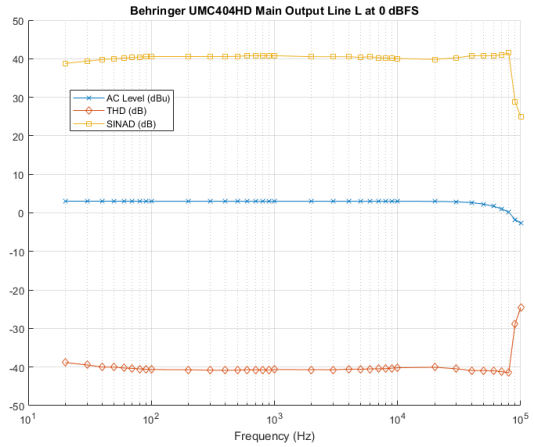


Fig. 3. Behringer UMC404HD sound card 0 dBFS playing merit figures

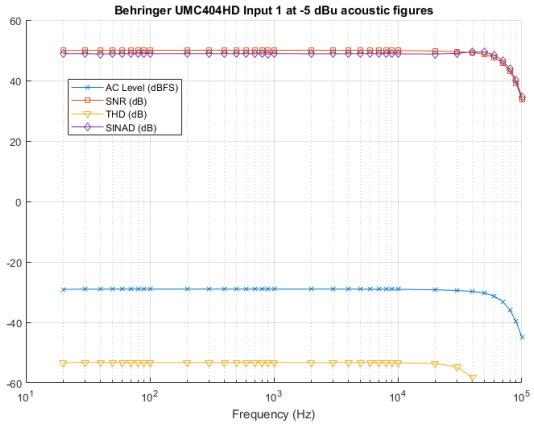


Fig. 4. Behringer UMC404HD sound card -5 dBu recording merit figures

B. The tests

In order to validate the usability of the testbench some audio devices and configurations have been tested. All of them are listed below:

T1. A through configuration consisting on an audio cable connecting the stereo output with the input. A previous testbench bypass check is allowed with this configuration.

T2. A 31 band graphical equalizer with an 80 Hz high pass filter and a 5 kHz rejection band filter on the first channel and an 8 kHz low pass filter and a 500 Hz rejection band filter on the second channel.

T3. An audio compressor with coupled stereo channels configured on 10 dB thresholds with 4:1 ratio, 300 ms attack time and 0.05 seconds of release time.

T4. A digital acoustic emission limiter with an 85 dBA emission limit and a up-to-8 dB slope on the low part of the spectrum. Implemented as a DSP (Digital Signal Processor) running a octave band continuous dynamic range compressor [7].

C. *The test results*

First of all, from the test T1, the through cable, a sound card frequency response is estimated. As shown in the figure 5 a flat 20 Hz to 40 kHz is achieved by only using the input and output interfaces of the Behringer UMC404 HD sound card.

The shown positive 3 dB represents an increase of the full scope of the input over the output.

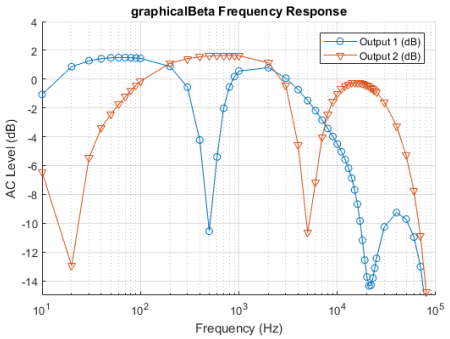


Fig. 5. Behringer UMC404 HD through configuration frequency response.

From T2, a modified frequency response can be observed on the graphical equalizer. The figure 6 shows the notch filters as well as the low and high pass filter measured during the data acquisition.

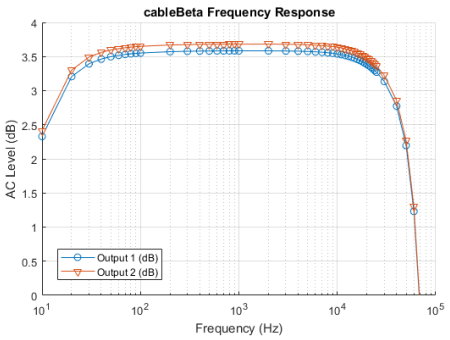


Fig. 6. Graphical equalizer frequency response.

T3 shows, an example of non-linear audio operation can be seen out of the results of the audio compressor test. Figure 6 shows how the dynamic compressor behave on 5 kHz audio patterns.

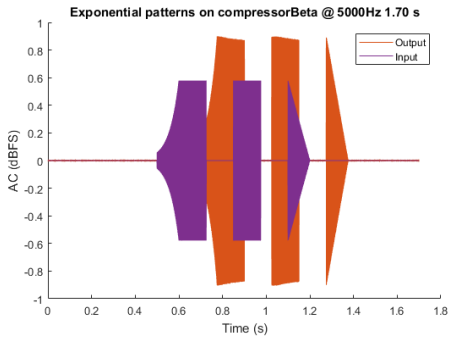


Fig. 7. Input – ouput diagram of exponential test tones on a audio dynamic compressor.

The last test, T4, determines the behavior of a complex audio device and demonstrate the conclusions that a black-box oriented test can help to make.

The measurement of a digital acoustic emission limiter shows how its performance in terms of merit figures decrease beyond the 23 kHz, as is shown in the figure 8.

This kind of behavior could be can be attributed to a 44.1 kHz digitalization of the signal in order to process it digitally in a DSP.

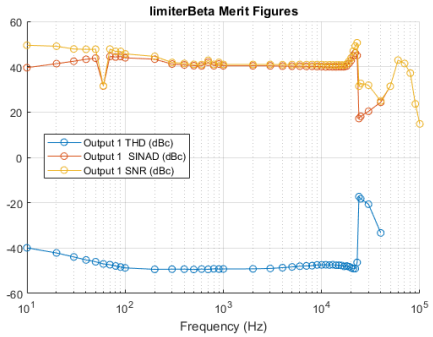


Fig. 8. Input – ouput diagram of exponential test tones on a audio dynamic compressor.

IV. Discussion

Having a wide range of measure while analyzing audio signals and devices allow a complete viewpoint of what is happening through the audio line.

In the shown examples the characterization of a graphic equalizer, the nonlinear operation of a compressor or the complex behavior of an acoustic emission limiter can be explained using obtained data and graphs. The main reason is that the understanding of these kind of complex system can be easily improved by mixing the theoretical concept with a practical experimentation.

Some interesting teaching or researching conclusions extracted from the different test due to the testbench automated results could be:

- Beside the expected 20 Hz to 40 kHz pass band of the T1 configuration, a 3 dB deviation is observed between the output and input of the Behringer sound card. The meaning of this observation is that the output dynamic range is 3 dB greater than the input's one.
- From T2, the Q factor of the individual notch filter can be measured. The neighboring frequencies attenuation is a fixed and not obvious parameter of a graphic equalizer which can be observed and measured by setting some notch filtering and executing the frequency analysis of the testbench.
- By examining the behavior of the dynamic compressor in T3 during different duration audio patterns, its attack and release time can be estimated. Some effects, such as pumping, can be observed in larger patterns.

- As explained before, T4 results show how an DSP (Digital Signal Processor) performs based on its sample frequency and how its (expected) antialiasing filters degrade the signal quality beyond the Nyquist limits. In this case, a 48 kHz audio sampling rate can be inferred from the quality of the signal before and after the 24 kHz limit.

Returning to the testbench design, the data analysis is separated from the data acquisition in order to keep the concepts accessible. Due to that, the system functionalities are easy to upgrade. Appending new tests and measurements will be just using the available measurements to perform new analysis or create new acquisition sets and implement the required analysis.

Based on the exposed concepts and the testbench workflow some other exercises are proposed as interesting upgrades:

- Use the electrical calibration (section 2.D) plus a sonometer to extend the functionality of the testbench. A realistic acoustic emission level expressed in decibel can be obtained using the combination of a loudspeaker plus microphone as DUT. A complete overview of an electroacoustical system is achieved having the linear relation between the digital full-scale magnitude to the electrical signal amplitude and the acoustic emission intensity produced by the loudspeaker.
- Profile the delay of a digital audio processing system using the testbench patterns test. In order to estimate the signal delay introduced by the DUT is necessary to estimate (mean value and standard deviation) the delay introduced by the Behringer sound card using the test T1 (through configuration). Once the base measuring delay is profiled, the DUT delay can be obtained.
- Generate an increasing amplitude test aiming to obtain an input – output diagram. Using this diagram, the threshold or the knee of a dynamic compressor can be measured accurately.

V. Conclusion

This first approach to an automated, low cost and home-made audio test bench have been designed with a teaching-oriented mind. The proposed upgrades to the system are an interesting evaluable task for a group practical lessons or a final degree project.

Due to this teaching focus, most part of the code is self-explicative. Extracted analysis are derived from data in a standard approach using basic concepts and procedures.

In the same path, stored data use common file format as .mat, .fig or .csv. This file formats allow a later data analysis using standard educational tools.

So that, this development aims to be a useful tool around which different concepts on electroacoustic can be developed. From basic concepts as SNR or SINAD to more complex ones like measuring and calibration theory or non-linear system analysis can be taught with some theoretical classes supported by practical classes using this kind of tools.

Acknowledgment

This project was partially financed by the company Ruido de Fondo SL and University of Granada.

References

[1] S. Temme, “Audio Distortion Measurements.” Brüel & Kjaer, 1992.

[2] A. Wilson and B. Fazenda, “Characterisation of Distortion Profiles in Relation To Audio Quality,” *Dafx 2014*, pp. 1–8, 2014.

[3] AES, “AES Standard method for digital audio engineering - Measurement of digital audio equipment,” *Audio Engineering Society*, vol. 1998, pp. 1–20, 1998.

[4] J. Watkinson, “The Art of Digital Audio,” *J. Electrochem. Soc.*, 1982.

[5] “MATLAB SNR Function Documentation,” *MATLAB 2017a Documentation*, 2017. [Online]. Available: https://es.mathworks.com/help/signal/ref/snr.html. [Accessed: 15-Jan-2018].

[6] “MATLAB SINAD Function Documentation,” *MATLAB 2017a Documentation*, 2017. [Online]. Available: https://es.mathworks.com/help/signal/ref/sinad.html. [Accessed: 17-Jan-2018].

[7] E. Lindemann, “The Continuous Frequency Dynamic Range Compressor,” in *Proc. 1997 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, New Paltz, NY*, 1997, no. 0, pp. 1–4.

A reconfigurable and expandable kit to teach electronic circuits based on Operational Amplifiers

Ricardo Costa, Paulo Portela, Gustavo Alves, Manuel Carlos Felgueiras and Clara Viegas
Polytechnic of Porto ISEP/CIETI/LABORIS;
rjc@isep.ipp.pt, portela.paulo@gmail.com, gca@isep.ipp.pt, mcf@isep.ipp.pt, mcm@isep.ipp.pt

***Abstract* — Teaching and learning Operational Amplifiers (OpAmps) in electronic engineering courses is a requirement, since they are a type of integrated circuit widely used for implementing simple or complex circuits. As a contribution to improve the way this integrated circuit is included in electronic engineering courses' curricula, it was designed and implemented a reconfigurable and expandable kit to teach electronic circuits based on the OpAmp uA741. Able to run in a PC, the kit comprises a software application locally interfaced with a hardware platform. This platform includes a circuit with the OpAmp uA741 able to be reconfigured according to a set of parameters defined by a software application. Besides the reconfiguration capability provided by this kit, it also enables the establishment of automatic connections for measuring or applying signals to a reconfigured circuit, plus the ability to simulate the same or other OpAmp-based circuits. This paper provides an overview about the OpAmp uA741 and about its relevance in engineering education. Features and functionalities provided by the kit is described. At the end, supported by a technical demonstration of the kit in an international conference, some teachers' opinions about their perceptions concerning its adoption in a real educational scenario are presented.**

Keywords - OpAmps, Reconfiguration; Simulation, Engineering education, E-learning.

I. INTRODUCTION

In the literature there are several methods to teach electronic engineering, most of them focusing on caching students' motivation to learn [1][2]. Videos demonstrating phenomena, plus free and web accessible interactive simulators, are just some of the learning objects that are being applied in education, with successful and promising results [3]. This is particularly important for teaching electronics, and in particular electronic sensors, since most of them are essentially analog, which requires well-designed educational tools. Although the experience shows that digital processing has advantages towards analog processing, such as more accuracy and versatilely to change the behavior of a circuit, the key point is that the signal processing part of a sensor always requires analogue to digital conversions. It is therefore required a previous processing of the analog signals, even if they are latter converted to the digital domain. Joining this evidence with the required versatility to design electronic circuits, in which concerns the ability to change their behavior without replacing the adopted components, contributed to the appearance of reconfigurable analog devices such as Field-Programmable Analog Arrays (FPAA)[1] and Programmable System-on-Chips (PSoC)[2]. The tendency for their wide adoption in the design of analogue electronic circuits may have important implications in the teaching strategy, as referred in [4]. Although, whatever the adopted device for designing analogue circuits are, internally they provide the use of one or more Operational Amplifiers (OpAmps), indicating that this type of Integrated Circuits (IC) is still one of the most important for the design of electronic circuits. It is therefore important to understand the best way to teach them according to the best educational methods.

Teaching and learning electronics cannot be limited to teacher-centered methods supported by traditional classroom environments. New strategies are being applied to catch students' interest and to incentivize their autonomy to learn electronics, such as the flipped classroom. This strategy is basically a type of blended learning that reverses the traditional learning environment by delivering or providing instructional content outside of the classroom, with good results in electronics engineering [5][6]. The new and advanced learning objects supported by the flipped classroom strategy, which may include distance learning approaches, have been incentivizing the adoption of the Problem Based Learning (PBL) methodology that defends students' autonomy to solve problems with teacher guidance. Recent studies indicate this methodology with active-learning, experiment-based and project-based learning approaches, a success to teach electronics [7][8], being therefore important to teach and learn OpAmps, which are traditionally the first IC considered in every electronic engineering course. OpAmps simplicity and utility to design simple and/or complex electronic circuits, and their adoption in recent electronic devices, such as the indicated FPAAs and PSoC, justifies, as already referred, their relevance in electronic engineering, which means that students should acquire good knowledge of their operation. Their adoption in many electronic devices and circuits, justifies that all electronic engineering courses include the study of these type of IC in their curricula. Understanding how they work and their common applications are therefore fundamental, requiring

[1] A Field-Programmable Analog Array (FPAA) is an integrated device containing configurable analog blocks. (e.g. of a well-known manufacturer: http://www.anadigm.com/fpaa.asp).

[2] Programmable System-on-Chip (PSoC) is a family of microcontroller integrated circuits by Cypress (http://www.cypress.com/products/psoc-creator-integrated-design-environment-ide). These chips include a CPU core and mixed-signal arrays of configurable integrated analog and digital peripherals.

the access to good and well-designed educational resources to incentivize the adoption of new educational strategies and methods. Regardless of the adopted strategies or methods, educational researchers agree that the experimental activity is fundamental in engineering [9][10][11], and therefore imperative in electronic engineering courses, and in particular to teach and learn OpAmps. Traditionally, educational methods based on theoretical, practical and experimental activates are adopted. While the first two activities are easily included in any course, since the only requirement is the availability of educational contents based on documentation or simulations; the experimental activities in some situations can become more difficult to include. Time constrains in a curriculum to conduct a particular experiment and the lack budget to acquire components and resources to setup circuits, are only some of the possible difficulties teachers and students may face in any electronic course.

Despite the enumerated difficulties, a solution based on a traditional laboratory is very common, but most of the time students must simulate the circuits using commercial software and setting up those circuits in a breadboard. There are many available software to simulate electronic circuits (e.g. Multisim, Spice, etc.), but some of them require licenses, with the inherent expenses, and setting up a circuit in a breadboard may become time consuming and cause some difficulties to students, due to badly applied connections, noises that may appear, among others. While in some situations setting up a circuit and expose students to those difficulties are part of the learning outcomes, in many situations the main outcome focus on the behavior of the circuit itself, based on the redefinition of some components and parameters. Therefore, this paper presents a reconfigurable and expansible electronic kit able to be reconfigured with different electronic circuits based on a single uA741 OpAmp. Currently it is locally accessed and reconfigured through a computer. It includes a tool to simulate some basic and typical circuits with the OpAmp, and enables the implementation of those circuits using real hardware, as in a traditional laboratory. The integration of a simulation tool together with the experimentation capability is one of the key features of the presented kit.

Besides this introductory section, this paper is divided in 5 other sections. Section II contextualize OpAmps in electronic engineering, presenting their main characteristics, plus some current educational platforms. Section III describes the developed kit, presenting its features and characteristics. Supported by some by the current functionalities provided by the kit and in the current trends of engineering education, section IV suggests some improvements to the kit and perspectives authors' opinions about its adoption in a real educational scenario. Before the conclusions presented in section VI, section V provides some teachers' perceptions about using the kit in education, supported by a demonstration carried out in an international conference.

II. OPAMPS IN ELECTRONIC ENGINEERING

OpAmps are widely used in electronics since they allow designers to implement several circuits without complex projects. In this section readers may get a brief history about OpAmps, their main characteristics and some available kits to support their teaching and learning.

A. Background history and main characteristics

According to the literature [12], the operational amplifier were firstly created by an American engineer named Loebe Julie in 1943. Its origins begins back to the vacuum tube era by the creation of the two-element tube-based rectifier invented by JA.A Fleming in 1904. This vacuum device was characterized by allowing the flow of current in one single direction, performing a rectification function as in the current diodes. Two years later, in 1906, Lee De Forest improved that vacuum device inventing the three-element triode vacuum tube that enabled the control and the amplification of the current, like in the actual bipolar transistors. It was supported by these two vacuum elements that late in 1920's and early in 30's born the first feedback amplifier in the Bell Telephone Laboratories (Bell Labs), leading, in 1940's, to the first tube OpAmps, a general-purpose form of feedback amplifiers using vacuum tubes. Due to their huge size, power consumption, and bulky, in 1950's and 1960's they began to be replaced by miniaturized solid state OpAmps, ending with the first IC OpAmp, as we know it today. The first OpAmp was created at the ends of 60's by the Fairchaild company with the model uA709 being latter replaced by the well-known uA741. These are both constructed based in bipolar transistors, but more recent OpAmps using FET and CMOS technologies can be found in the market with better performances (e.g. LTC6268[3] , LTC6244[4] , LTC1052[5]), such as less power consumption, higher dynamic responses, and reliability. Despite this evolution, the uA741 is still probably the most adopted in engineering courses to teach the basics of AmpOps, essentially due to its good reliability and low prices compared to others[6].

B. Characteristics and common applications

Although the inherent differences among the different models of OpAmps, all are classified as linear devices internally comprising several semiconductors, resistors and/or capacitors. Commonly used together with other external components, such as resistors, transistors, diodes, capacitors, inductances, or others, their electrical characteristics facilitate the implementation of simple or complex circuits. They allow the establishment of linear or nonlinear mathematical relations to create different types of circuits, such as amplifiers, filters, limiters, etc.

Some of the most important characteristics of an OpAmp are the high voltage gain and high input impedance, as well as the low output impedance, that mathematically allow the establishment of particular relations between the input and

3 The LTC®6268/LTC6269 is a single/dual 500MHz FET-input operational amplifier with extremely low input bias current and low input capacitance.
4 The LTC6244 is a dual high speed, unity-gain stable CMOS op amp that features a 50MHz gain bandwidth, 40V/µs slew rate, 1pA of input bias current, low input capacitance and rail-to-rail output swing.
5 The LTC®1052 and LTC7652 are low noise zero-drift op amps manufactured using Linear Technology's enhanced LTCMOS silicon gate process. Chopper-stabilization constantly corrects offset voltage errors.
6 Per example the LTC6268 model is about 10 times more expensive than the uA714. After a brief web search the price of the LTC6268 was about 5€ and the uA741 about 0.50 €.

output voltages. The generic circuit that represents an OpAmp constructed based on bipolar technology and some important mathematical relations is illustrated in fig. 1 It comprises an inverter and non-inverter inputs (v1 and v2), interconnected by a very high input impedance (Zin), and the output voltage (Vout), which is a result of a serial circuit with an output impedance (Zout) and a dependent voltage source (Vo). The traditional high value of Zin indicates that an OpAmp consumes very low current (bios current). It can also be seen that Vout depends on the Open Loop gain (Ao) and on the Common Mode gain (Acm), commonly specified by the denominated Common-Mode Rejection Ratio (CMRR), which represents the ability of the device to reject common-mode signals that appear simultaneously and in-phase in both OpAmp inputs. The low value of Zout indicates that ideally a load circuit do not influence the AmpOp circuit operation, despite the current limit of the output (in the uA741 is about 20 mA). Parameters such as band-width, unbalance offsets, temperature influence, among others, should also be analyzed in every project, before choosing a particular OpAmp.

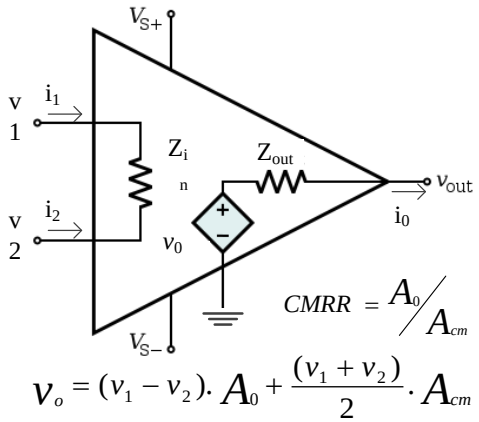


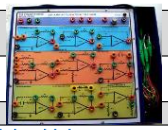
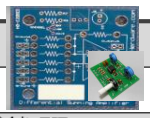
Fig. 1. General schematic of uA741 OpAmp and some mathematical relations.

Therefore, supported on these characteristics, the use of OpAmps facilitates the implementation of many electronic circuits that would be much more complex and less accurate to implement if only discrete components were adopted. Nevertheless, implementing circuits with OpAmps requires the use of those components to design circuits, most of them following closed loop designs. The most commonly taught in electronic courses are the inverter and non-inverter amplifiers, integrators and differentiators circuits, since they are the basic circuits whose comprehension allow the implementation of more complex electronic circuit (e.g. filters).

C. *OpAmps in education*

Despite the available simulators that adopt OpAmp models to simulate circuits, the inherent complexity of OpAmps and the environment conditions where they operate may create unexpected behaviors not considered in every well designed software simulator. Therefore, it is very common to teach OpAmps not only using the traditional presentation in classrooms, doing pen & paper exercises sometimes complemented with simulations, but also provide experimental activities to students, so they may understand that simulating sometimes do not provide the same results as a real experimentation. The awareness to the inherent difficulties that real implementations may pose should be transmitted to every engineering student, and the design of electronic circuits using real equipment is therefore fundamental in every well design engineering course. This educational requirement justifies the existence of several kits with OpAmps available on the market, in order to facilitate, motivate and increase students' learning autonomy. The kits available in the market to create electronic circuits supported by AmpOps can be grouped in: i) reconfigurable kits, that basically facilitate setting up circuits by changing or controlling the components' values, and ii) PCB-based kits to easy setting up circuits with AmpOps. Table 1 provides a list of some kits, and shows two examples. Despite the learning outcomes focus on teaching the operation of OpAmps, these two groups of kits fulfil different educational needs. It is reasonable to say that using reconfigurable kits facilitates verifying the operation of the OpAmp, while PCB-based kits allow a more direct contact to the component itself. The last basically serves as a guide to facilitate setting up circuits with AmpOps, exposing students to a direct contact with electronic components.

TABLE 1. SOME EDUCATIONAL KITS WITH OPAMPS AVAILABLE IN THE MARKET.

Reconfigurable	OpAmp Circuit Trainer: Ohm Technologies	
	http://www.ohmtechnologiees.com/lab-trainer-kits.html	
	OpAmp Training Kit: Delta Technologies	
	http://www.deltatechnologies.co.in/op-amp-training-kit.htm	
	Basic Operational Amplifier: Acumen Labware	
	http://www.acumenlabware.com/electronics-training-kits/basic-operational-amplifier.html	
	OpAmp Trainer Kit: Batra Trading Company	
	http://www.btcinstrument.com/electronics-characteristics-curve-apparatus.html	
PCB-based	LM741 OpAmp IC with Development PCB Kit: NightFire	
	http://vakits.com/op-amp-ic-development-design-kit-lm741	
	Voltage follower Operational Amplifier (buffer) kit: EID	
	http://www.eidusa.com/Electronics_Kits_OP_AMP_BUFFER_1.htm	

Only a few platforms are exclusively dedicated to teach and learn OpAmps and most of them don't integrate any simulation tool (e.g. [5][6]) that would allow students to complement experimental and practical activities required in any engineering course. Others, such as the NI-Elvis, are not specific dedicated to OpAmp circuits. The NI-Elvis platform allows users to setup any type of electronic circuits using a traditional breadboard, and permits the measurement of specific signals using a set of self-integrated instruments. In fact it is a good solution to provide in a traditional laboratory, but it is very expensive (about 2500 €), and it is not dedicated to teach OpAmps, which would require from students the same effort to implement electronic circuits as using a traditional breadboard and common laboratory instruments. Another interesting commercial product in the market is the Lab Volt FACET boards[7], which are commercial systems prepared for education. Their adoption can be considered to teach OpAmps and other electronic circuits, as already reported in [13], but it

7 https://www.labvolt.com/products/facet-circuit-boards-and-courses.

is a commercial product, with the inherent expenses of acquisition and the impossibility of easily changing its design and, in some situations, the components used to setup electronic circuits, which may limit the versatility a classical classroom requires.

Therefore, providing good and well-designed and versatile kits at low prices focusing on teaching a particular component, such as an OpAmp, may motivate and facilitate teachers' and students' activities. Additionally, integrating in the same kit a simulation tool and an experimental and reconfigurable platform would facilitate the interface between the practical and experimental activities, avoiding this way the use of separated tools. Taking this into consideration, and focusing on teaching and learning AmpOps' operation with design simplicity, it was designed and developed a reconfigurable and expandable kit with the OpAmp uA741 to enable the design and experimentation of different electronic circuits. The kit is controlled by a computer, which enables an automatic replacement of components, and integrates a simulation tool for a previous verification of some of those circuits, as detailed in the next section of this paper.

III. DEVELOPED KIT

The developed kit focus on the simulation, setup and experimentation of electronic circuits based on the OpAmp uA741. It is supported by a local architecture comprising a hardware platform accessed through a software application.

A. Overal architecture and functionalities

As represented in the block diagram of fig. 2 and in the picture of fig. 3, the kit comprises a reconfigurable hardware platform interfaced with a common PC through a serial connection. The platform may have external instruments connected to it, and the PC runs a software application to reconfigure the platform and simulate circuits. The platform includes an OpAmp uA741 implementing a main circuit able to be reconfigured to design the circuits to experiment (e.g. inverter circuit and others). The reconfiguration capability provided by the platform is implemented by a set of other electronic components, such as analogue switches, digital resistors, etc. The platform was designed and developed to enable its expandability. It provides a set of connecting points to integrate other external components in specific branches of a main circuit, which means that the complexity of a reconfigured circuit to experiment may be more or less complex according to those attached components (e.g. resistors, capacitors, other ICs, etc.). By using the software application, it is up to the users to decide the possible circuits to experiment by integrating those external components on the branches of the circuit. To measure or apply some electrical signals in different points of a reconfigured circuit, the platform also enables the connection of external and commercial instruments (e.g. oscilloscope, multimeter, function generator, etc.). Before using the kit the teacher must connect some instruments to particular connecting points of the hardware platform. Later, students should use the software application to place the probes of each instrument in different points of the reconfigured circuit, as they would do when using a breadboard. The advantage of this approach is that all connections are automatically made, avoiding errors and facilitating the measurement of some specific signals.

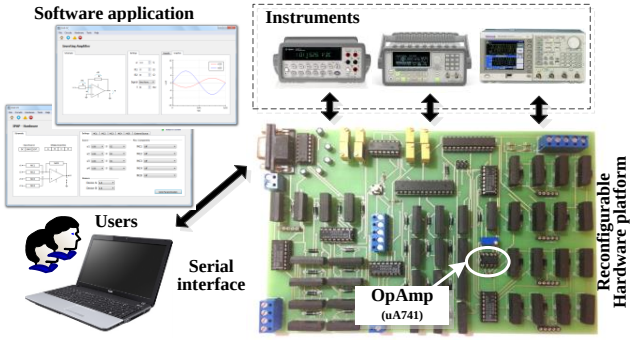


Fig. 2. The overall architecture of implemented Kit.

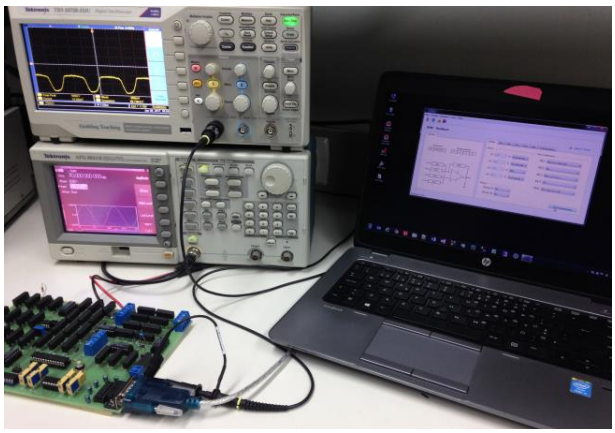


Fig. 3. Picture of the electronic kit exemplifying the use of two external instruments (oscilloscope and function generator)

B. Hardware platform

The main element of the kit is the reconfigurable hardware platform and, as already referred, the main element of the platform is the OpAmp uA741 used to form the main circuit that is able to be connected with external components. These components can be grouped in a so-called Module of Components (MC). Additionally, the platform provides 4 other terminals to connect the external instruments to measure or to feed an input terminal of a reconfigured electronic circuit, a RS232 connection to establish the interface to the PC, and a set of terminals to power on the platform. To enable the automatic reconfiguration with distinct electronic circuits using the components provided by the attached MC, the platform has a set of relays (9007-05-00 - Coto Technology) controlled by a µC (ATmega328/P). A digital resistor enables users to control an internal DC power that may source an input terminal of a reconfigured circuit, instead of using an external DC power. fig. 4 illustrates some of the most important interfaces and components available in the platform.

Thus, the platform is reconfigured with distinct circuits based on the available MC. As represented in fig. 5, users may connect 2 MC to the inverter terminal, 2 MC to the non-inverter and 1 MC to establish a negative feedback loop

connection. The components within each MC are selected based on the position of a set of relays. The MC connected to the input terminals forms the MC-n branches and they are controlled by two distinct groups of relays (relays 1 - has 3 relays; and relays 2 - has 4 relays). The MC that creates the negative feedback loop connection forms the MC-F branch and it is controlled by the group relays 2. Each MC can be connected to the platform, and in particular to a branch of the main circuit, using one of four sets of five terminals, as exemplified in fig. 6. These terminals enable connecting a MC to the inverter or non-inverter terminals, or to establish the negative feedback connection of a traditional OpAmp circuit.

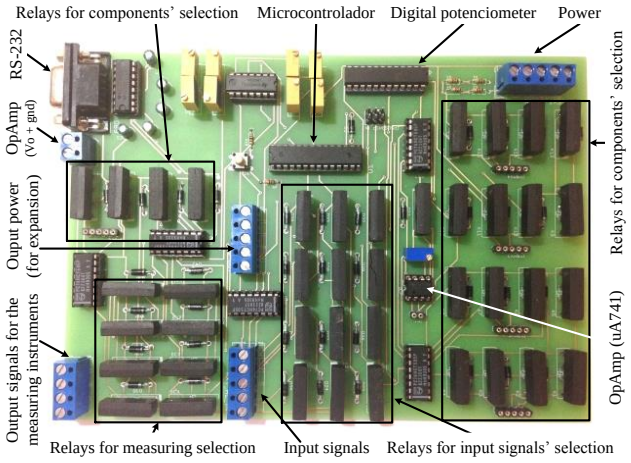


Fig. 4. Photography of the reconfigurable hardware platform with the main interfaces and the internal components.

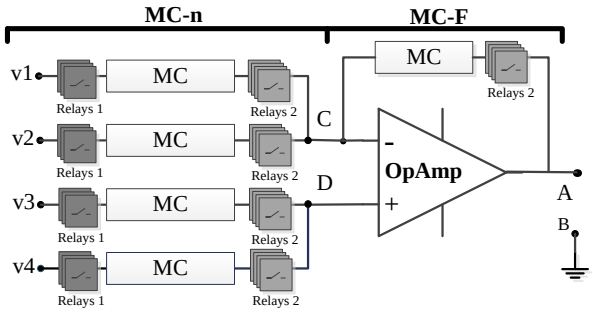


Fig. 5. Schematic with the overall architecture of the reconfigurable main circuit.

Once a MC is physically connected to the platform, users may select one component (or subset of components). This selection is made through the indicated relays, turning them on/off. A MC can integrate different type of components. The only requirement is that each module should has 4 input terminals and a common output. Internally it can have resistors, capacitors, or even a specific electronic circuit. It is up to the user (the teacher) to decide what kind of MC it would be provided in the reconfigurable main circuit. In the exemplified case illustrated in fig. 7, the MC has 2 resistors, a short-circuit and a capacitor. By changing the position of a relay in the group relays 2, a particular component can be selected and inserted in the main circuit (fig. 5). The group relays 1 is used to select the type of signal used as an input of a particular reconfigured circuit, i.e. the signal source for each inverter or non-inverter terminal. Note that group relays 1 is only provided for the MC-n braches, while group relays 2 is provided for both type of branches, MC-n and MC-F.

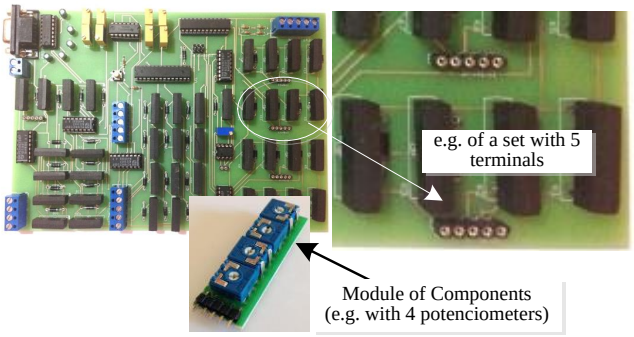


Fig. 6. Module of Components (MC) used to setup circuits based on the uA741 OpAmp.

To measure particular signals of a reconfigured circuit, users can place the probes of the selected instruments in particular points. As illustrated in fig. 8, and in accordance with points A, B, C and D, specified in the schematic presented in fig. 5, currently users can attach the instruments to the platform using 3 pairs of terminals; two of them able to be moved according to the position of two sets of 4 relays, and other with fix connections between the OpAmp output terminal (vo) and the ground (points A and B). Despite the limitations of the connecting points able to use by the instruments, users have some versatility to measure different voltages using, per example, a two channel oscilloscope and a multimeter.

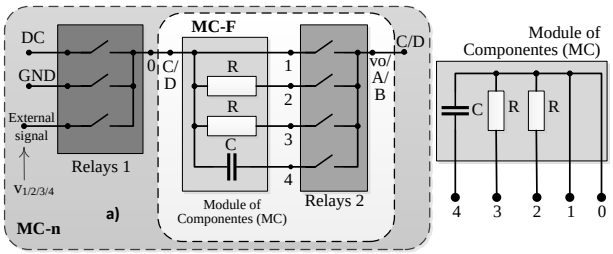


Fig. 7. Schematic for the selection of components using a MC with 2 resistors, 1 capacitor and 1 short-circuit;

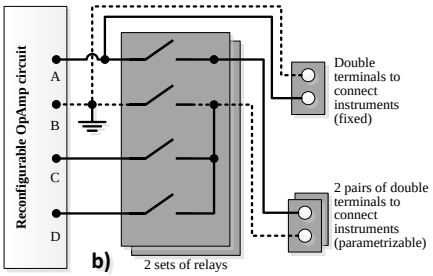


Fig. 8. Adopted schematic for selecting the measurement points on the circuit under test.

The selection of a particular component or a circuit provided by a MC, and the selection of each measurement

point, is selected using the software application, which also enables the simulation of some simple circuits.

C. *Functionalities of the software application*

The software application belongs to the developed kit and, as represented in the diagram of fig. 9, it has two main functionalities for analyzing electronic circuits based on the OpAmp uA741: i) simulation and ii) experimentation.

The simulation of a particular circuit is supported by a set of predefined mathematical models specified using the R software[8]. The obtained results of those simulations can be archived in a data base or listed in a comma delimitated text file (*.cvs) for future analysis.

To experiment some (or all) the simulated circuits, the software application allows the reconfiguration of the platform. As indicated, this process involves the components' selection provided by the available MC attached to the platform, and the definition of the source signals attached to the inverter or non-inverter input terminals of the reconfigured circuits. Once defined, users are able to experiment the circuits by specifying the measurement instruments and the location of their probes in particular points of the circuit, also using the software application. The measurements are acquired by common and commercial instruments attached to the platform.

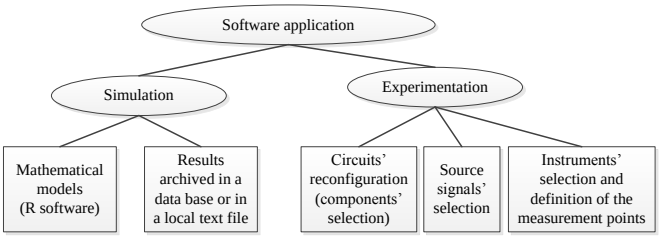


Fig. 9. Functionalities provided by the software application.

During the experimentation the software application basically communicates with the platform using the serial interface, by sending commands and receiving replies. The commands send information to the platform for turning on/off a particular relay, for defining a source signal, for specifying the points to place the probes of a particular instrument, etc. In order to facilitate the synchronization between the software application and the platform, the adopted µC, which interprets all commands and generates the associated replies, internally implements a memory divided into different fields that specifies, in each moment, the way the platform was reconfigured with a particular circuit. All the information sent by each command are gathered into this memory so the µC can read it to know the current configuration state of the main circuit.

As indicated, for simulating a particular circuit the software application should has the associated mathematical models defined in R scripts. These scripts do not need any recompilation, since they are interpreted by the R software module that is installed in the PC together with the application. The parameters of the circuit able to simulate and the associated results retrieved from a particular simulation are all specified in a XML format file, facilitating this way their presentation in the interface of the software application. For experimenting a particular circuit, teachers must physically attach the required MC. The students may setup a particular circuit and describe the available component in a XML file (setting.xml), so the software application may read it and display that information in the interfaces of the software application.

8 R is a free software for statistical computing and graphics (https://www.r-project.org/).

D. *Interfaces of the software application*

The software application, whose main interface is illustrated in fig. 10, includes a set of 4 buttons, a main menu and other interface panels. The set of 4 buttons enables controlling the simulations and the experimentations (run, reset and status, plus a help menu) and the main menu has 4 other submenus, namely:

- File: provides access to files R files and enables the selection of other files to save the results obtained from the simulations (data base or a comma delimitated text file - *.cvs format -);
- Circuits: Access to the available circuits for simulation;
- Hardware: Access to the platform for reconfiguring and experimenting a circuit;
- Tools: Access to a webcam interface that can be attached to the PC to facilitate users' observation of a particular measurement provided by an instrument;
- Help: Information about the software application.

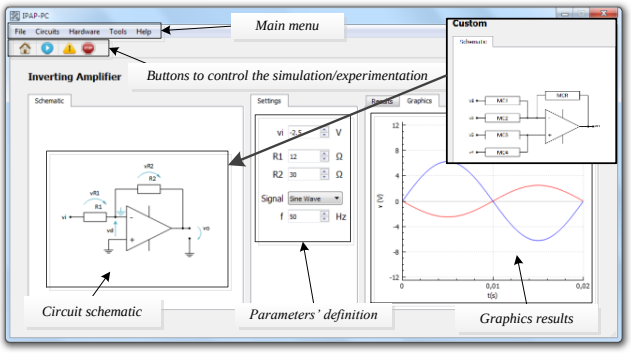


Fig. 10. Example of an interface for simulating circuits.

The interface panels display the schematic of the circuit to simulate, gives the possibility for users to select parameters of that circuit, and displays the results of the simulation. In the example, an inverter amplifier simulation plus an indication to a custom circuit layout is illustrated. The software application provides several other circuits for simulation, namely the inverter, non-inverter, differential, integrator, comparator, follower, plus a custom circuit. This custom circuit enables users to select different types of circuits according to the provided R modules defined in the software. This means that the software application can be extended with other circuits once the mathematical R modules are included (this update is responsibility of a technician or a teacher). Additionally, the

custom circuit layout is similar to the available possibilities to reconfigure the platform. This means that after a simulation users can experiment the same circuit using the platform, once the MC attached in the platform are in accordance with the available R modules created for simulation.

Therefore, for running a simulation, users should select the circuits' submenu and chose a particular pre-defined circuit or, the custom circuit. After selecting the circuits' submenu, users have access to the circuit's schematic and to a panel where they can select the values for each component. After running the simulation, they get the results that are presented in a numeric or graphical form. The obtained results can them be save in a data base or in a text file, by selecting the File submenu.

For experimenting a particular circuit, users should select the hardware submenu to access the interface illustrated in fig. 11. This interface provides the schematic of the custom circuit that is basically the main circuit with the OpAmp uA741 able to be reconfigured by changing a set of parameters. The components available in the platform and the indication if a specific input is connected to a particular external source are indicated in each of the remaining submenus able to select using different tabs. These submenus are automatically filled when a particular MC or external source are attached to the platform and the XML file (settings.xml) is edited. This task belongs to a technician or to a teacher during the preparation of a particular experiment. For placing the probes of the instruments attached to the platform in the accessible points of the main circuit (A, B, C or D) users should selected the available solutions for each of the devices. Once all parameters and instruments probes' connections are defined, users must send that information to the platform using the button named send parametrization. To enable a comparison between simulating and experimenting a circuit, both simulation and experimentation interfaces provides a button to switch between them. Note, however, that not all simulating circuits can be experimented using the platform and vice-versa, since simulating and experimenting requires independent preparation of the kit. While experimenting a circuit requires attaching the MC and defining a particular XML file describing the available components; simulating a circuit requires defining the mathematical R modules. Obviously, in order to allow students to compare simulations with real results obtained through experimentation, it is desirable that a particular circuit can be both simulated and experimented.

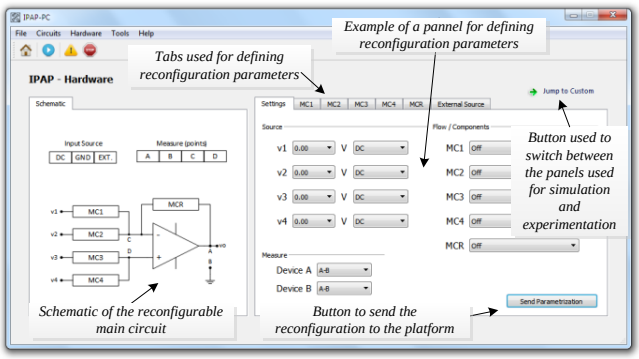


Fig. 11. Interface for reconfiguring and experimenting circuits.

IV. Perspectives for its Adoption in Education

Currently the kit offers some advantages for electronic engineering courses. The possibility it offers for students setting up circuits supported by a computer, overcome some problems that they may arise if a traditional breadboard was adopted. By using a circuit, able to be reconfigured and/or parametrized with different components, overcome possible bad connections between components caused by human mistakes or broken wires that are traditionally difficult to detect. Of course this approach may limit a relevant learning outcome that is the importance to expose students to possible problems that may arise when setting up a circuit using a breadboard. Nonetheless, it facilitates the design and the experimentation of a particular circuit.

The use of this kit in a real educational context must therefore be evaluated concerning the learning outcomes. The facility the kit provides to setup circuits should be considered for situations where the main educational goal focus essentially in the behavior of the circuit it-self. The problems that traditionally a student face when setting up an electronic circuit should not be the focus of its learning. Additionally, with this type of kit, teachers may easily include the experimental activity of any laboratory, since the time required for a student to setup an electronic circuit with an OpAmp is drastically reduced. They are able to faster and easy the validation of theories and calculations previously made. They do not need to be concerned picking up components and setting up the circuit, activities that are traditionally very time consuming and in many situations are not the focus of the learning outcome.

It is also important to emphasize the possibility this kit offers for students to simulate circuits before experimenting them with real components. With current kit students don't need to use external simulators that can bring some disadvantages such as; some of them are not free, others requires a previous installation of several software applications and tools, and others requires an web access to use them, which would demand an internet connection that, in some situations, can be inaccessible.

Another relevant issue of the kit is its expandability. It provides the possibility of adding complex and/or simple external MC in some branches of the main circuit. Teachers may provide those MC to students, or insert them in the kit, expanding, this way, the possible circuits to be experimented without the necessity to ask students to setup the circuit by their own, as they usually do using a traditional breadboard.

Despite the flexibility, current version provides to reconfigure and expand AmpOp-based circuits, it has some limitations that are important to consider for future improvements. Currently it is impossible to implement positive loops, and it is difficult to design circuits requiring complex branches (e.g. the well-known Sallen-Key Lowpass Filter circuit would require many external connections). Moreover, currently the kit only allows a local simulation/experimentation. Its application in a traditional laboratory class would require that each individual or group of students have one of these kits. Although it would facilitate simulating circuits without any commercial software, and setting up the circuits with real components, the associated

costs to have several kits available in a laboratory can be prohibitive. This means that its adoption in a traditional laboratory is not possible if costs are a mean concern. Therefore, to overcome cost problems, the remote access to the kit as a remote laboratory is a solution to consider in future developments. Once the kit is PC-controlled, its remote access is a natural evolution, which has been seen as an added value to improve students learning outcomes in engineering education as a complement to the hands-on and simulated laboratories [14][15]. As illustrated in fig. 12, a single PC can act as a server to access the platform and to enable a remote access to interfaces, similar to the ones provided by the software application. Once remotely accessible, a single device connect to the Internet (e.g. a PC or a smart phone) would be able to remotely simulate, reconfigure and experiment the circuits. In this situation some other considerations would be posed, namely the best solution to access the kit. The software application can run on the users' PC or remotely accessible. In the first situation all the simulations are made in the users' PC, while in the second situation the application should be installed in the server and, when a student wants to simulate a particular circuit it can trigger a thread to handle each particular request or simple respond to each request according to sequential accesses, as in a waiting list, such as a FIFO (First-In First-Out).

The access to the hardware platform can be more demanding, and two possible accessing modes can be considered, namely i) synchronous or asynchronous. In the synchronous mode a time slot is reserved when a student is accessing the platform. In the asynchronous mode students may connect to the platform whenever they want, defining the configurations and acquiring results. There is no time reservation to access the platform since the commands send and the retrieved responses can be also acquired based on a FIFO waiting list. Both solutions can be considered, although, and in particular for current kit, the asynchronous mode brings more advantages towards the synchronous mode. Despite more complex to implement, the asynchronous mode is more adequate when the remote experiments do not comprise moving elements, as in the current solution. By using the asynchronous mode students may select the configuration they want to experiment and wait for the results. This type of approach simplify the accessing management and provides more accessibility to the platform, since it is not reserved for a period of type, being all this process transparent for students. A publication describing a solution for experimenting electronic circuits using an asynchronous mode was already published [16], but its appliance in education had no continuity. Although, a typical and well tested remote laboratory that uses this accessing mode is the VISIR system [17]. It is currently well accepted by the educational community [18][19] and is being adopted in several European institutions (Portugal, Spain, Sweden, etc.). Additionally, an ongoing ERASMUS+ project, named VISIR +, intends to widespread their adoption in Latin American countries by integrating it as an important leaning object of a common electronic engineering course [12]. However, and despite the maturity of the VISIR system, that makes it as a solution in education, it is not exclusively dedicated to experiment OpAmp circuits, neither it has a simulation tool, that would facilitate the integration of the practical and the experimental activities in a single education tool. Furthermore, it is an expensive system (it can cost about 20.000 €) and it requires users to setup a circuit using a virtual breadboard, which could not be a learning outcome.

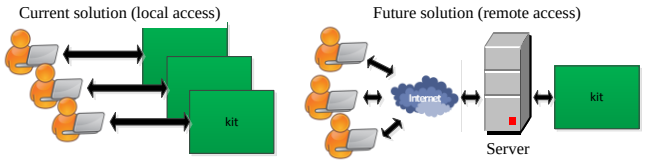


Fig. 12. Current and future solution for accessing to the kit.

Therefore, despite current kit can be applied in an engineering course given support to the experimental lessons providing a simulation tool plus a reconfigurable and expandable kit that allow the conduction of real experiments with AmpOps without the necessity of setting up circuits from scratch, it requires some improvements before its adoption. The remote access is probably the most relevant one and important improvement to take into consideration in future releases, since it will reduce the associates costs that would exist if several kits were required to conduct an experimental lesson.

Although the considerations presented in this section are supported in authors' opinions, it was decided to get other researchers and teachers' opinions about the kit and its relevance to electric engineering education, namely to teach uA741-based electronic circuits.

V. TEACHERS' PERCEPTION USING THE KIT IN EDUCATION

To understand the possible relevance the kit may have to improve the way AmpOps can be teach (and learn) in electronic engineering, the kit was demonstrated in a technical session of the international conference named exp.at'17[9] held at the University of Algarve. Based on a submitted abstract, already published in [20], the kit was demonstrated to some participants, most of them teachers in electronics, and some opinions were acquired.

The indicated conference was selected since it offers to the participants an opportunity to present their recent work and in particular it includes exhibition sessions to present demo products to the research community. It was precisely in one of those exhibition sessions that the kit was demonstrated to some participants, and their opinion and their perception for using the kit in education was acquired though a small quiz filled by 10 of them. During the demonstration some simple circuits with the OpAmp were prepared, namely the inverter and non-inverter circuits, one integrator and one differentiator. Placed in a specific workbench, participants had the opportunity to see the operation of different circuits configured in the kit, and to pose questions about it. After this process, the most interested in the demonstration were invited to fill-in the quiz. This quiz, whose responses are presented in table 2, was mainly divided in 3 parts: Part I to understand the participants' background;

9 Exp.at'17 is a joint organization of the University of Porto and the University of Coimbra, held at University of Algarve, Portugal, with its collaboration and the technical support of IEEE (IEEE Industrial Electronics Society and IEEE Education Society) and the Portuguese Engineers Association. (http://expat.org.pt/expat17/)

part II to evaluate their interest in the kit, and part III to verify if they are receptive to adopt this kit in their classes.

Despite the short number of participants (10 participants), the obtained results should be considered relevant to evaluate the proposed solution (kit), since these participants are active researchers in the area, and some of them have many years of expertise teaching electronics. Generically observing the results presented in the table, it is evident that the kit triggered interest to the participants, since the large majority indicated that they would like to use the kit in their classes, even if they are not currently teaching the thematic. In this context, also note that the remote access is a requirement for two of the participants to use the kit, while all the others do not pose any constrains using it like it is (with a local access).

TABLE 2: QUIZ ABOUT TEACHER'S PERCEPTION USING THE KIT IN EDUCATION.

Participant #:	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Years of expertise in the area	1	18	6	20	2	2	26	11	25	5
Did you teach the contents supported by the educational kit ?	Y	Y	N	N	N	N	Y	Y	Y	Y
If yes: Is it usual doing laboratorial experiments with the students about the thematic supported by the kit?	Y	Y					Y	Y	Y	Y
If yes: Did you already use similar tools in your classes?	N	N					Y*7	Y*8	Y	N
If you adopt this kit in the classes (select the best options):										
What would be the benefits?										
i. Contribution to consolidate the knowledge in the thematic.	✓		✓						✓	✓
ii. Contribution to integrate the knowledge						✓				✓
iii. Contribution to contextualize the theoretical part of classes.	✓			✓	✓		✓			✓
iv. Promote experimental competences.				✓	✓		✓	✓	✓	✓
v. Support students during their learning.							✓	✓	✓	
vi. Reduce the required time to explore the thematic.								✓		
vii. Improve the teaching methodologies.	✓					✓	✓		✓	✓
viii. Expand the adopted resources.		✓								✓
ix. Improve the students' motivation and enthusiasm.					✓					✓
What difficulties do you preview?	*1									
i. Lack of time.				✓						
ii. Lack of technical means.					✓		✓		✓	
iii. Lack of effort by the students.		✓	✓	✓						
iv. Lack of colleagues' support.					✓		✓			
v. Lack of relevance for the learning outcomes.										
vi. Lack of know-how facing problems or students' feedback.						✓			✓	Y
Would you like to have this resource available to support your classes?	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y
…. and if it was remotely accessible?	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y

*1 – "Had to implement a couple of circuits";
*7 – "Oscilloscope, wave-generator, bread-board circuits"
*8 – "Custom design"

It is also interesting to note that participants selected many relevant benefits using it in education, in particular the promotion of experimental competences to the users (students), and most of them see its use as a contribution to contextualize the theoretical part of classes. In which concerns the possible difficulties for using the kit, there were not a clear unanimity. The lack of effort by student, lack of technical means and lack of know-how facing problems or students' feedback were pointed out as the most probable ones. From our analysis this indicates that from the teachers' point of view the kit will be interesting but it would require a previous presentation to students, so they can understand the versatility it offers to simplify and easy the design of electronic circuits based on the uA741. Additionally, according to the obtained responses it is reasonable to say that teachers see a technical support to use the kit as fundamental, in order to overcome possible problems that may occur. At the end, and by unanimity, all participants indicate that a remote access to the kit would incentivize its adoption, despite most of them had already indicated their interest using it in their classes. These results, and after some punctual conversation during the presentation, justifies and incentivize some improvements to the kit, in particular the development of a remote access, which is also our intention to do in the near future. After the implementation of this feature, it is also our intention to evaluate the kit in a real educational scenario, allowing students to validate the kit so it can be possible to understand and eventually confirm some of the perceptions indicated by participants and by the authors of this paper.

VI. CONCLUSIONS

OpAmps are probably the most known IC in electronic engineering. The simplicity they provide for designing electronic circuits (amplifiers, filters, limiters, etc…) justifies their wide adoption, and the requirement to teach and learn them in every electronic engineering course. As any other engineering thematic, teaching and learning OpAmps requires a compromise among 3 educational activities, namely the theoretical, practical and experimental. While the first activities are easily included in any curriculum, since they are basically provided by documentation and/or simulations, the experimental activity requires a particular attention, since the pedagogical resources are more difficult to implement and their design and functionalities must be well accepted by students and teachers.

Therefore, this paper described the design and the implementation of an educational kit to support the teaching and learning of OpAmps. Currently locally accessible by a software application that enables simulating and experimenting real circuits based on the OpAmp uA741, its adoption in a real educational context was not validate yet. Nevertheless, the functionalities and flexibility it provides to simulate and create different circuits based on an OpAmp perspectives its well acceptance in education to support the required experimental component of any curricula, as predicted by some researchers and teachers in the area. Despite some minor technical improvements to the developed kit are still required, one of the most important improvement is to enable its remote access. It is predictable that only with a remote access to the platform the kit could be a real solution to consider in an engineering course. Currently the kit gives some advantages to easy and fast the implementation of electronic circuits without the necessary use of a traditional breadboard, components and wires. If the educational outcome focus on understanding the circuit it-self, the use of the kit is a solution (complementary or not) to a traditional laboratory. However, since it is locally accessed, using it in education would require that each student or group of student should has one kit, which will increase very much the associated expenses (the developed kit had a price of about 300 €, considering the components and the implementation in the PCB board). Since the expenses are traditionally a key concern that have been justifying the adoption of different education tools, namely the use of remote laboratories, it is reasonable to say that providing a remote access to this kit, managed by a virtual learning environment such as Moodle, would guarantee its well acceptance and relevance to improve electronic engineering education.

ACKNOWLEDGMENTS

The work described in this paper refers to a final degree project, 3th year degree project, in electrical and computer engineering, concluded by the second author of the paper in the School of Engineering of the Polytechnic of Porto (ISEP) - Portugal.

REFERENCES

[1] Frédéric Amiel, Dieudonné Abboud, and Maria Trocan, "A Project Oriented Learning Experience for Teaching Electronics Fundamentals," IEEE Commun. Mag., pp. 98–100, Dec. 2014.

[2] Iñigo Ugarte, Víctor Fernández and Pablo Sánchez, "Motivation of students in the learning of digital electronics through the double integration: Remote/presential work and theoretical/laboratory classes," presented at the Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE), Vigo, Spain, 2012.

[3] Albert D. Ritzhaupt, "Learning Object Systems and Strategy: A Description and Discussion," Interdisciplinary Journal of E-Learning and Learning Objects, vol. 6, 2010.

[4] Carlos Felgueiras et al., "Reshaping digital methodologies to the analog world," in Remote Engineering & Virtual Instrumentation (REV), UNED, Madrid, Spain, 24-26 February 2016, 2016.

[5] Hayrettin B Karayaka and Robert D. Adams, "A Hybrid Flipped Classroom Approach to Electrical Engineering Students," Interdiscip. J. E-Learn. Learn. Objects, vol. 6, p. 22, 2010.

[6] Li Li, "Project-based learning in electronic technology: a case study," European Journal of Engineering Education, 40, 2015.

[7] James P. Becker, Carolyn Plumb and Richard A. Revia, "Project Circuits in a Basic Electric Circuits Course," IEEE Trans. Educ., vol. 57, pp. 65–72, May 2014.

[8] Julio Pastor Mendoza, José Manuel Villadangos Carrizo and Francisco Javier Rodríguez Sánchez, "Project based learning experiences for embedded systems design," in Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE), Sevilha, Spain, 22-24 June 2016.

[9] Norrie S. Edward, "The role of laboratory work in engineering education: student and staff perceptions," IJEEE - Int. J. Electr. Eng. Educ., vol. 39, no. 1, pp. 11–19, Jan. 2002.

[10] Romanas V. Krivickas and Jonas Krivickas, "Laboratory Instruction in Engineering Education," Glob. J Engng Educ, vol. 11, no. 2, pp. 191–197, 2007.

[11] Jing Ma and Jeffrey V. Nickerson, "Hands-On, Simulated, and Remote Laboratories A Comparative Literature Review," ACM Comput. Surv., vol. 38, no. 3, p. 24, 2006.

[12] Walt Jung, "Section H: Op Amp History," in Op Amp Applications Handbook, Newnes/Elsevier, 2005, p. 74.

[13] Horan B., Joordens M., Hall R. and Stojcevski A., "The old and the new : student perceived efficacy of electronics laboratory equipment," in AAEE 2013 : Proceedings of the 24th Australasian Association for Engineering Education Conference 2013, 2013, p. 12.

[14] B. Balamuralithara and P. C. Woods, "Virtual laboratories in engineering education: The simulation lab and remote lab," Comput. Appl. Eng. Educ., p. 12, Mar. 2009.

[15] James R. Brinson, "Learning outcome achievement in non-traditional (virtual and remote) versus traditional (hands-on) laboratories: A review of the empirical research," Comput. Educ. - ELSEVIER, vol. 87, pp. 218–237, Sep. 2015.

[16] N. Sousa, G. R. Alves, and M. G. Gericota, "An Integrated Reusable Remote Laboratory to Complement Electronics Teaching," IEEE Trans. Learn. Technol., vol. 3, no. 3, pp. 265–271, 2010.

[17] Mohamed Tawfik et al., "Virtual Instrument Systems in Reality (VISIR) for Remote Wiring and Measurement of Electronic Circuits on Breadboard," IEEE Trans. Learn. Technol., vol. PP, no. 99, p. 1, 2012.

[18] A.V. Fidalgo et al., "Using remote labs to serve different teacher's needs A case study with VISIR and RemotElectLab," in 9th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV'2012), Bilbao, Spain 4-6 July, 2012, pp. 1–6.

[19] Javier Garcia-Zubia et al., "Empirical Analysis of the Use of the VISIR Remote Lab in Teaching Analog Electronics," IEEE Transactions on Education, vol. PP, no. 99, pp. 1–8, 04-Oct-2016.

[20] Ricardo Costa, Paulo Portela and Gustavo R. Alves, "An educational kit to teach and learn Operational Amplifiers," 4th Exp. Int. Conf. Expat17 Universidade Algarve -Port., p. 3, Jun. 2017.

Transistor teaching back to Transfer-Resistor

A summary table of definitions and students' perceptions

Carlos Felgueiras, Ricardo Costa, Andre Fidalgo, Gustavo Alves
CIETI/DEE, School of Engineering, P.Porto
Porto, Portugal
mcf@isep.ipp.pt; rjc@isep.ipp.pt; anf@isep.ipp.pt; gca@isep.ipp.pt

***Abstract*— The Bipolar Junction Transistor (BJT) study is a regular subject on analog electronic subjects taught in the initial phase of electronic engineering courses. This electronic component, often considered elementary, is far from being simple to explain because it covers several concepts, such as three Regions of Operation, two Working Regimes, and two Region of Operation Boundaries. It is not surprising then that students often find it difficult to understand the functioning of this component. The present article describes partially the work developed by a team with a number of students in order to understand the difficulties of teaching/learning the BJT. We present the students' perceptions from the analysis of several traditional and modern means to support the learning of the BJT. Interestingly, the learning BJT model considered simpler for beginner students corresponds to the model that originally gave it the name i.e. Trans-Resistor (Transistor).**

Keywords*— *Bipolar Junction Transistor, leaning support means, students perceptions

I. INTRODUCTION

Higher-level education is seen as a key factor and as an essential role for people who wants to have future success in modern societies. Its importance is well recognized regardless of the significant costs carried for every country. In fact, the number of people who pursue this level of education has impressively risen in the last half century. This increase in students brings new challenges for both, each country's economy and teaching systems [1]. Traditional methodologies mainly centered on the professor have been revealed to be ineffective when delivered to the masses [2]. This unsustainable situation has led not only to an adjustment of teaching strategies but and also to divert more attention into students and teaching/learning methods [3,4]. The Bologna reform brought a reorganization inside universities in order to optimize education resources [5,6], which in turn led to a tendency for shortening their degrees' time and to center them in a given knowledge specific area [7,8]. These kinds of degrees became very narrow, with a high level of specialization and a thin scope. This is a new strategy that brought advantages and disadvantages, particularly in the case of engineering education [9]. On one hand, this strategy allows the development of technological and educational processes closer to each other [10]. As the scope becomes narrower, the easier it is to achieve a higher skill level, and in particular if it is supported by technological means.

On the other hand, the mentioned strategy brings the disadvantage of decreasing competences in terms of abstraction for dealing with more realistic and complex models. This is an issue that assumes special importance in Electric and Electronic Engineer courses. Traditionally, in the first years students work mostly with simpler and ideal models of electrical elements and then, in last years, they use more realistic and detailed models.

This is important in Electronic Engineer Degrees where electronic subjects are typically divided in two different arenas commonly called Digital Electronic and Analog Electronic. At a degree level, we can observe a fragmentation, i.e. students taking options that will later define their own jobs. Inside the Electronic Engineering degree we can see students clearly oriented to hardware design, while others prefer software design. Even inside hardware design, a new fragmentation takes place: a very important part of students prefers digital design, whereas just a few others select the analog and mixed-signal design. As a consequence, we have an unbalanced situation resulting on lots of specialists in the digital arena, contrasting with few in the analog arena. In fact, there exist a few analog programmable / configurable components, called PSoC and FPAA [11], but the market acceptance has been slow and they are not usually part of the Analog Electronic curricula. The students' inclination for digital circuits instead of analog and mixed-circuits is clear. The reason that explains this behavior, however, is more complex than the simple division of the type of signals involved. The fact is that the design flow of each arena presents significant differences as a consequence of each arena's maturation state. In the digital area, the design is mostly based on s*oftware*, whereas in the analog arena the design is based on *hardware* and also on components *behavior* knowledge. One of those components is precisely the Bipolar Junction Transistor (BJT). For teachers this is no more than one elemental component. For students, it is nowhere as simple, for this component poses important constraints on its understanding.

The BJT study is a regular subject on analog electronic subjects taught in the initial phase of electronic engineering courses. This basic current amplifier electronic component, often considered elementary, is far from being simple to explain because it covers several concepts, such as three *Regions of Operation*, two *Working Regimes*, and two *Regions of Operation Boundaries*, besides other features. Students often find this non-linear component difficult to understand. A significant part of the traditional means of teaching / learning

support available today has been developed for the previous generation of engineering students, therefore it is scientifically correct but may not be adequate for the new generation engineering students. They are naturally digital natives, with less initial ability to deal with models involving a high level of abstraction, and more likely to seek and accept information in the form of electronic support such as text, slides and movies.

The teaching support structure of the transistor has remained reasonably constant over the years since this component is always the same. However, there have been efforts and proposals from various authors, especially to increase the diversity of teaching methods. In [12], the author proposes the reutilization of teaching methodologies of digital circuits that can be applied in the teaching of analog programmable circuits. In [13], the author introduces a methodology based on sub-division to explain the macroblock of the Operational Amplifier. Instead of going from the elementary circuits (e.g., Resistor, Transistor), an intermediate phase of sub-blocks is proposed. In [14], the author describes the teaching of circuits with BJT through the motivation of the students for their practical use.

The present article describes partially the development of means to support engineering teaching (slides, films) with a methodology that always involves the teacher and the student. In the first stage, a definition and synthesis of the various operating zones and operating regimes was made. Interestingly, the learning model considered simpler by the student coincides with the model that originally gave it the name, Transfer-Resistor (Transistor), i.e., a resistor controlled by a current [15].

II. METHODOLOGY AND DEVELOPED LEARNING SUPPORT MEANS

The aim of this work is to perceive whether electronic students are prepared to deal with different models imposed by real components, identify their difficulties and link them to actual gaps in their education. The method of research here is *ex post facto* research [16]; the researcher takes the effect and examines the data retrospectively in order to establish causes, relationships and explanations. The collected data consisted in some class discussions' transcriptions and courses and degrees curricula analysis. The results relate to Electric Power Systems Engineering at ISEP (Polytechnic of Porto School of Engineering) students at the end of their first year, second semester (2016). A teacher/researcher perception triggered this research. In order to test his perception, he placed the hypothesis of his students in the end of his course "Electronics" not being able to explain nor comprehend the actual behavior of an electronic component in terms of Model.

In electrical engineering teaching all the components are represented in the form of Models that have an associated specific behavior. The model of a nonlinear component is often described through the association of several linear components. However, the teacher has been noting the difficulty of students intellectually transposing the model to its component. An example is the junction diode. Its operation is traditionally explained by the *V-I characteristic curve* of the diode [I_D = f (V_D)] that relates the voltage V_D on its terminals with the across current I_D.

For the diode on the ON state, one of the most common used model includes a voltage of 0.7 V in series with a conduction resistance. This situation often creates conflicts since voltage sources are, for students of the 1st year, systematically associated to devices that *promote* electrical current. However, if it is said that the *V-I characteristic curve* of the diode reflects its *resistive behavior*, these doubts promptly disappear. After that, a diode at ON state is them seen as a *resistive limiter*, i.e., device which limits its own voltage to a value of 0.7 V instead a device which promotes the electric current; nor could it be otherwise, since the *V-I characteristic curve* of the diode expresses a resistive behavior. After that, it becomes simpler to speak of about several *V-I characteristic curves* such as those of a Zener diode or that of a Voltage Dependent Resistor (VDR), TRANSIL, etc., devices especially important to include in electrical installation against over-voltages resulting from lightning discharges.

For the diode on the OFF state, the typical model consists on an open switch, again a resistor, and a very high one at that.

During electronic class the students preferred a similar approach to explain how BJT works. In fact, the teacher had already identified that students reveal difficulties on understanding how the TBJ works using the traditional BJT model approach. Once students seemed to prefer an approach based on the *V-I characteristic curve*, then the teacher challenged a group of 3 volunteer students to develop a work that reflected their vision. This challenge was accepted and the work was divided in several parts:

a) The BJT working mode: regions of operati, the boundaries between operating zones; working regimes;

b) BJT model: definition of a basic model for BJT;

c) BJT Percetion analisys: of the clarity of those previous concepts in various means used by the student to study BJT; Ethernet sites, slides, videos, books;

d) BJT Supporting means development: develop a set of slides; movies

e) BJT Supporting means evaluation: teaching / learning satisfaction questionnaires.

In this paper we are focusing on points a), b) and also, but briefly, the point c).

III. BIPOLAR JUNCTION TRANSISTOR WORKING MODE

Technically this component has three pins and appears in a large variety of enclosures. Fig. 1 shows a transistor example and the correspondent symbol.

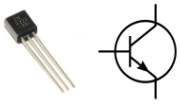


Fig. 1. Bipolar Transistor example and the correspondig schematic diagram.

One important part of this work was to study the topic and define a set of simple definitions related to the bipolar transistor, in order to later synthetize its mode of operation. The BJT can operate in three different *Regions of Operation* which are designated as:

- Cutoff
- Active
- Saturation

Is important to define the BJT *Regions of Operation Boundaries*. Finally, the BJT can operate in two *Working Regimes* that are designated as:

- Linear
- Switching

According to students opinion, (later demonstrated in the satisfaction questionnaires), "*definitions should be short and clear"*. One major task was to establish definitions according previous requirements. The first approach was to define literally the *Regions of Operation* and *Working* R*egime*. It was difficult, because each author tended to establish their own definition, and sometimes there were conflicts among them.

A. Bipolar Junction Transistor models

The bipolar transistor is a complex component, not easy to explain in a simple model. They are many models to explain bipolar transistors; some are simpler but disjointed from reality and others more realistic but much more complex. Fig. 2 presents a model currently used to explain the transistor behavior.

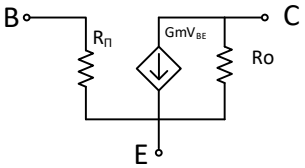


Fig. 2. BJT simplified pi model.

This model was considered considerably complex for beginners. The equivalent model presented in the Fig. 3 is only used when the BJT operates in the Active Region. For the remaining Regions of Operation, others models should be used. One main task was to establish a very simple model for Base–Emitter and Collector–Emitter pair pins. For Base–Emitter, the considered best approach was the diode corresponding to a well-known PN junction. Later in the developed slides, students emphasized that the P-N diode, Base-Collector in a BJT and Gate – Cathode in a Thyristor all present the same behavior. For the Collector–Emitter equivalent, the model considered easiest to understand was a variable resistance dependent on the base current. The simple model for a NPN transistor is shown in Fig. 3.

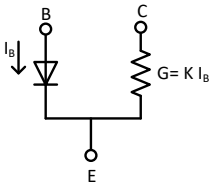


Fig. 3. A simple model for a NPN transistor.

The Collector–Emitter behavior can be represented as a resistance modulated by the Base–Emitter current. In fact, historically, the name of Transistor has it origin on Transfer – Resistor and according to the students involved in this study, this component working description is sufficiently *simple* and *comprehensive* to be used as the initial model for the study of transistors. For Collector–Emitter equivalent model, students consider three possibilities according the Region of Operation. *Cutoff, Active* and *Saturation* were considered, respectively, an open switch, a variable resistor and a closed switch. Note that this Resistor is a controlled one, which imposes a collector current that is given:

$$I_C = \beta \ I_B \qquad (1)$$

In simpler words, this resistor acts as a *current limiter* controlled by a *control current* I_B. Later on, this controlled resistor will be replaced by a controlled current source in order to have a more realistic and complex transistor model.

In short, the students defined a set of definitions (i) for all three regions of operation, (ii) for the two boundaries of operation, (iii) for the two working regimes, and (iv) a Collector-Emitter equivalent for each region. The results of these definitions are summarized in Table 1.

TABLE I. SUMMARY OF REGIONS SETTINGS OPERATION AND OPERATING REGIME OF TRANSISTOR

		BJT parameters						BJT- Regions of Operation Boundaries	BJT Collector – Emitter Equivalent	BJT Working Regime	
		V_{BE}	I_B	I_C	I_C/I_B	V_{CE}	V_{CB}			*Linear*	*Switching*
BJT Regions of Operation	Cutoff	<Vγ	= 0	= 0	–	V_{CC}	> 0	$I_B \neq 0$			•
	Active	≃Vγ	> 0	> 0	β	<V_{CC} > Vγ	> 0			•	
	Saturation	≃Vγ	> 0	> 0	< β	< Vγ	< 0	$V_{CB} = 0$			•

The value designated by Vγ refers to the conduction voltage of a PN junction and its value is:

$$V\gamma \approx 0{,}7\ V \qquad (2)$$

This table was especially well received by the students involved in this study because it is very compact and especially simple. It should be noted that the definitions mathematically depend on equalities (= sign) or inequalities (signs > or <). Also, one of the great advantages recognized is the clear identification of the boundary between the *Active* region and *Saturation* region. In the available literature this border is often defined in an unclear way and based in examples such as: "a BJT is in saturation region when, for example, V_{CE} == 0.2V". In this table it is clear that the boundary between *Active* and *Saturation* occurs for $V_{CB} = 0$

B. Students' perceptions

There are many means available for supporting learning about the bipolar transistor. The information can be presented in the traditional book support or in electronic support accessible through the internet. In this part, we must take into account two important aspects: Concepts' consistency and the correspondent student's perceptions. Note that those concepts associated to the transistor operation are not widely accepted. One of them is the boundary between the *Active* / *Saturation* region. For students, it is more important to have one than none. However, some learning means give examples instead definitions.

Students' perceptions is probably the most complicated issue to overcome. In fact, teachers have high level of knowledge about the bipolar transistor subject and as such, all learning means are satisfactorily clear. For students who only have low level of knowledge, the situation is completely different, everything becomes very complicated to understand. Thus, for a teacher, it is very hard to perceive student´s difficulties and perceptions. One way to overcome this in our work is to use students as kind of perception sensor. This is why we decided, from a very early stage of this study, to put students in the work team in order to reduce the risk of developing means that are not really useful for learning.

C. Avaiable learning support means perceptions

A team of students from the third year of Electronic Engineering degree developed this part of the work based on a scenario: the main idea was to suppose that they were on their first year degree and they need to study for an exam on an Electronic subject. What kind of means of studying would be used? All actions should be as realistic as possible. When questioned about learning means that would be considered, they chose internet sites, slides and videos. Despite not being chosen by the team, the teacher suggested also including some books for later comparison purposes. Then, it was suggested to select some examples of each kind, making only one remark: the selection should reflect a real situation as much as possible. No further suggestion was made and all selected examples were their responsibility only.

We had previously selected a set of transistor working concepts and the next step was to assess them using a psychometric scale commonly involved in research that employs questionnaires. This scale uses limits from 1 to 5, corresponding to a lesser degree of satisfaction to a higher degree of satisfaction, respectively. It is important to emphasize that the present means analysis **does not** correspond to any kind evaluation of the means utilized, but only to a set of **student's perceptions**. All analyzed means can be absolutely correct, both scientifically and pedagogically, and yet obtain a low assessment level in this work. Moreover, the analyzed means are probably adequate for a given level of electronic knowledge but on this work the target is to identify and/or develop learning means to support leaning on bipolar transistor for students on the very early stage of Electronic Degree. As said, the analyzed means were as listed:

- internet sites
- internet slides
- internet videos
- books

For all examples and for reasons of privacy, the order of assessed means does not match the order in the correspondent order in the associated table. All sites were assessed on May, 2016. For Internet Sites, the students selected the sites listed below:

- http://www.radioamadores.net/transistores.htm
- http://www.portaleletricista.com.br/transistor-funcionamento-e-aplicacoes/
- http://www.ebah.pt/content/ABAAAAV-oAB/transistor-bipolar-juncao
- https://en.wikipedia.org/wiki/Bipolar_junction_transistor
- http://www.allaboutcircuits.com/textbook/semiconductors/chpt-4/bipolar-junction-transistors-bjt/
- http://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_1.html
- http://www.electronica-pt.com/componentes-eletronicos/transistor-tipos

Table II presents all considered transistor working concepts perceptions for selected above sites.

TABLE II. TRANSISTOR WORKING CONCEPTS PERCEPTIONS FOR SELECTED FOR *INTERNET SITES*

Transistor Operation	**Transistor Working Concepts**	**Site #**						
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Transistor Regions	***Regions identification***	5	1	2	1	1	4	5
	Regions sequence	1	1	1	1	1	1	1
	Region characteristics	1	1	2	1	1	2	2
	Region boundaries	1	1	1	1	1	1	1
	Collector – Emitter equivalent	2	1	2	1	1	1	3
Transistor Regimes	***Regimes identification***	1	1	1	1	1	1	2
	Regions for Switching regime	1	1	1	1	1	1	1

For *Internet Slide Sites* the selected sites are listed below:

- http://slideplayer.com.br/slide/1486956/
- http://slideplayer.com.br/slide/282772/
- http://slideplayer.com.br/slide/1468596/
- http://pt.slideshare.net/firozamin/3bipolar-junction-transistor-bjt
- http://aries.ucsd.edu/NAJMABADI/CLASS/ECE65/12-W/Slides/ECE65_W12-BJT.pdf

Table III presents all considered transistor working concepts perceptions for selected above sites.

TABLE III. TRANSISTOR WORKING CONCEPTS PERCEPTIONS FOR SELECTED FOR *INTERNET SLIDE SITES*.

Transistor Operation	Transistor Working Concepts	Slide site #				
		1	**2**	**3**	**4**	**5**
Transistor Regions	***Operation regions identification***	2	5	3	5	4
	Regions sequence	2	4	1	1	3
	Region characteristics	1	3	4	2	3
	Region boundaries	1	1	1	2	3
	Collector – Emitter equivalent	1	1	5	2	1
Transistor Regimes	***Regimes identification***	1	1	2	2	1
	Regions operation for Switching regime	1	1	1	2	1

For *Internet Videos* the selected sites are listed below:

- https://www.youtube.com/watch?v=koYahjuYZe8
- https://www.youtube.com/watch?v=qqKgcJJN5r0
- https://www.youtube.com/watch?v=iwoebVm7ZVg
- https://www.youtube.com/watch?v=BAdCpVBhEvI&list=PLz5lDMUFoTXY2i302mV8rh0KkU17i10uN
- https://www.youtube.com/watch?v=usRAuTFK0wU&list=PLz5lDMUFoTXY2i302mV8rh0KkU17i10uN&index=2
- https://www.youtube.com/watch?v=SAZ8tttGW8c
- https://www.youtube.com/watch?v=uuPWfFHshZQ

Table IV presents all considered *transistor working concepts* perceptions for selected above sites.

TABLE IV. TRANSISTOR WORKING CONCEPTS PERCEPTIONS FOR SELECTED FOR *INTERNET VIDEOS*.

Transistor Operation	Transistor Working Concepts	Video site #			
		1	**2**	**3**	**4**
Transistor Regions	***Operation regions identification***	5	1	2	1
	Regions sequence	1	1	1	1
	Region characteristics	1	1	2	1
	Region boundaries	1	1	1	1
	Collector – Emitter equivalent	2	1	2	1
Transistor Regimes	***Regimes identification***	1	1	1	1
	Regions operation for Switching regime	1	1	1	1

For *Books* the selected examples are listed below:

- Sedra, A., Microelectronics Circuits, Oxford Press, 5.ª ed., 2004
- Richard C. Jaeger, Microeletronic Circuit Design, 4ºed
- Neamen, D., Microelectronics, Circuit Analysis and Design, McGraw Hill, 3.ª ed.ª, 2007.

Table V presents all considered *transistor working concepts* perceptions for selected books.

TABLE V. TRANSISTOR WORKING CONCEPTS PERCEPTIONS FOR SELECTED FOR *BOOKS*.

Transistor Operation	Transistor Working Concepts	Book #		
		1	**2**	**3**
Transistor Regions	***Operation regions identification***	3	4	3
	Regions sequence	3	3	3
	Region characteristics	3	4	3
	Region boundaries	3	3	3
	Collector – Emitter equivalent	3	3	3
Transistor Regimes	***Regimes identification***	3	3	3
	Regions operation for Switching regime	3	3	3

D. Supporting means development

In this phase of the work, the student's team proposed to develop some new supporting means, trying to reflect on it the identified missed information from their perceptions. The proposed new supporting means was a set of slides to which a sound track would be later added in order to produce a movie. The advantages were clarity, color and movement that captivated the student's attention. A beta version was already developed but working only in Portuguese language and available on [17]. Fig. 4 presents an image from that set of slides.

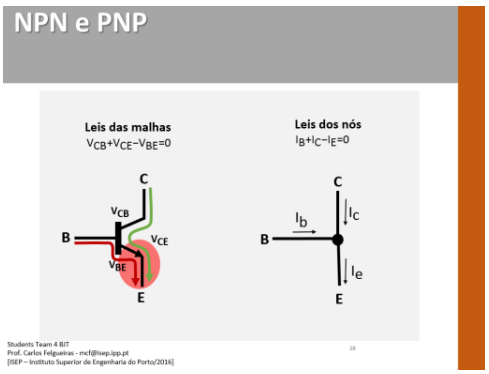


Fig. 4. Image of one slides from the set developed by the students team.

The adopted methodology, options and strategy will be explained in further presented work, following the validation of results using a pre-post questionnaires procedure.

IV. Discussion, Learning Developed Means and Preliminary Results

This section analyses results from student's perceptions. Analyzing all previous tables we can globally conclude that the perceptions of the selected means to support learning on bipolar transistor are poor. This result was as surprising as unexpected. The substantiation was also made by the student as follows.

In regard to *Internet Sites*, students said that the subject is exposed is either very superficial or too deep. Too little or too much information is equally unsatisfactory for beginners. The number of operation regions was poorly passed, and the respective order was never referred. In the set of slides developed by students, they emphasize this issue. Authors frequently refer "the BJT changes from the Cutoff to Saturation". This kind of phrase is widely used but, if not conveniently explained at least once, it creates in the student the notion that a BJT can pass directly from Cutoff Region to Saturation Region (and *vice-versa*) without going through the Active Region, which is incorrect. What really happens is that the passage through the Active Region is so quick and transient that it is not considered a stable state. Regarding Regions Boundaries and BJT *Working Regimes*, it was never mentioned.

In relation to *Internet Slide Sites*, students can perceive an improvement in clarity on the Operation Regions and the associated working order. However, the explanation about *Regions Boundaries* and *Working Regimes* still poor.

In relation to *Internet Videos*, students said that they were had the best performance of all analyzed means. Only the *Working Regime* and the shifting from *Cutoff Region* to the *Saturation Region* during the *Switching Regime* was poorly explained.

In relation to *Books*, student said that is the least attractive of all means because they present very plain text and too many definitions, being the least picked piece of information. For this reason, the rating was only medium.

The most interesting phase in this work was the verification that, along with this study, some information in some sites has changed. Students were pleased to verify that the information was clearly improved. Their comments stated "*... In the end, we are right in our analysis, since they have changed the information on the site in order to improve clarity for the students, according to our perspective…*" This moment was very rewarding for both students and teachers.

According to the students involved, it is necessary to develop a set of teaching resources oriented to the modeling of real components using ideal components and the graphic visualization of the behavior through the *V-I characteristic curve*. This aspect is very important to translate the graphical behavior of components or circuits. The role of the source acting as a current promoter and sources that function as current limiters should be clear. At the graphical level, no distinction is made, but the sources that promote the electric current do not dissipate thermal energy whereas sources that act as limiters convert electrical energy into heat, since they are inherently resistive. The behavior of the BJT using a controlled current source explains the electric behavior; the explanation that this is a limiter explains the thermal behavior. It is thus easier to explain the limitations in dissipated power of the components, e.g. VDR

V. Conclusion

The BJT is frequently considered an elemental component from Analog Electronics. Far from simple, it is a complex component that needed to be understood very deeply at behavior level. Our perceptions study tends to reveal that available learning support means apparently are more useful for teachers than students in the early phase of the engineering courses. A team of students accepted the challenge to analyze a set of resources used to support teaching / learning in BPT. Interestingly they support the idea that BJT models should be dynamic. BJT models should be simpler for beginners and growing in complexity along the course. They also developed a set of slides and videos aiming, in their opinion, to be clearer for beginner students in electronics.

Our next work will include slides and movie description and further validation.

Acknowledgment

Financial support by national funds through FCT & Research Project UID/EQU/00305/2013.

References

[1] Schofer, E., Meyer, J. W. "The Worldwide Expansion of Higher Education in the Twentieth Century" American Sociological Review, 70 (6) pp. 898-920, 2005.

[2] Biggs, J. "Teaching for Quality Learning at University". Buckingham, UK: Open University Press. 1999.

[3] Felder, R. "How to Improve Teaching Quality", Quality Management Journal, 6(2), pp. 9-21, 1999.

[4] Ramsden, P. "Improving Teaching and Learning in Higher Education: the case for a relational perspective". Studies in Higher Education, 12(3), pp. 275-286, 1987.

[5] Bologna Declaration (1999) Available at: http://www.ehea.info/Uploads/Declarations/BOLOGNA_DECLARATION1.pdf; (accessed 01 November 2014)

[7] Heitmann, G. "Challenges of engineering education and curriculum development in the context of the Bologna process", European Journal of Engineering Education, 30(4), pp.447-458, 2005

[8] Klemeš, J.J., Kravanja, Z., Varbanov, P.S., Lam, H.L. "Advanced multimedia Engineering Education in Energy", Applied Energy, 101, pp.33-40, 2013.

[9] Williams, B. R. "Engineering education, accreditation and the Bologna Declaration: a New Zealand view", International Journal of Electrical Engineering Education, 44(2), pp.124-128, 2007.

[10] Aslan, S., Reigeluth, C. M. "Educational Technologists: LeadingChange for a New Paradigm of Education", TechTrends, 57(5), 2013.

[11] Felgueiras, C., Areias, D., Fidalgo, A., Macedo, J., Alves, G. R., "How to Use Remote Labs for Enhancing E-Learning on PSoCs", International Journal of Online education (IJOE), Vol.12(4), 2016.

[12] Felgueiras, C., Areias, D., Fidalgo, A., Macedo, J., Alves, G. R., "Reshaping digital methodologies to the analog world", Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV) Conference, Madrid, Spain, 24-26 February 2016.

[6] Kushnir, I. "The role of the Bologna Process in defining Europe", European Educational Research Journal, 15(6), pp.664-675, 2016.

[13] Maria Barbarosou, Ioannis Paraskevas, George Kliros, Antonios Andreatos, "Implementing transistor roles for facilitating analysis and synthesis of analog integrated circuits", *Global Engineering Education Conference (EDUCON) 2017 IEEE*, pp. 423-430, 2017, ISSN 2165-9567

[14] Pedro Fonseca, Paulo Pedreiras, Filipe Silva, Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 694, pp. 382, 2018, ISSN 2194-5357, ISBN 978-3-319-70835-5.

[15] JR Pierce, "The naming of the transistor," Proceedings of the IEEE, Volume: 86, Issue: 1, Jan 1998; DOI: 10.1109/5.658756

[16] Cohen, L., Manion, L., Morrison, K. "Research Methods in Education", 6th ed., Routledge, Taylor & Francis Group, London and New York, 2007.

[17] Felgueiras, C., "Slides de apoio às aulas de electrónica", available on http://ave.dee.isep.ipp.pt/~rjc/mcf/

Análisis de diferentes Técnicas de Modulación PWM: Comparación y Diseño.

J.S. Artal-Sevil, R. Dufo-López y J.L. Bernal-Agustín.
Dpto. Ingeniería Eléctrica. Escuela de Ingeniería y Arquitectura EINA.
Universidad de Zaragoza. Campus Río Ebro. María de Luna, 3.
Edificio Torres Quevedo, 50018. Zaragoza, Spain.
email: {jsartal; rdufo; jlbernal}@unizar.es

***Abstract*— El principio de funcionamiento de los convertidores de potencia está basado en la implementación de estrategias o técnicas de modulación PWM. Por lo general la adopción del algoritmo o estrategia de modulación PWM tiene por objeto mejorar el comportamiento del sistema: mejorar el contenido armónico (THD) o la respuesta dinámica, reducir las pérdidas de conmutación, incrementar la eficiencia de la conversión, etc. La literatura académica recoge diferentes técnicas de modulación PWM que se han ido complicando con el propósito de conseguir una mayor fiabilidad, eficacia y un menor ruido en el equipo. El objetivo del presente documento ha sido desarrollar un análisis comparativo de los diferentes algoritmos de control y técnicas PWM. Matlab/Simulink ha sido el software utilizado para el análisis y desarrollo de las diferentes técnicas de modulación PWM presentadas, así como las topologías de convertidores. El propósito ha sido desarrollar la simulación de las diferentes técnicas de modulación PWM (métodos continuos y discontinuos) y contrastar los resultados con el montaje experimental. La finalidad es que el estudiante pueda entender de manera más fácil y visual su funcionamiento. Desde el punto de vista del estudiante es importante comprender cada una de las estrategias de modulación, así como observar las ventajas e inconvenientes de los diferentes métodos presentados. En este documento también se discuten el método y detalles para la adquisición de conocimientos y su implementación en el aula.**

Keywords*— *Pulse Width Modulation (PWM), Discontinuous Modulation (DPWM), Power Quality, Delta-Sigma Modulation, Modular Multilevel Converter (MMC), Efficiency, SiC, Switching Losses, Control Techniques, Inverter.

I. Introducción

Los convertidores de potencia tienen una amplia utilización en la industria. La aparición de modernos microcontroladores (μCs) o dispositivos electrónicos configurables (FPGAs) ha favorecido su implementación en diferentes equipos. Aunque el principio de funcionamiento de estos sistemas está basado en las diferentes técnicas o estrategias de modulación usadas. Los convertidores de potencia pueden utilizar diferentes estrategias de modulación PWM (SPWM, THIPWM, SVM, DPWM, etc.). Frecuentemente la adopción del algoritmo o tipo de modulación tiene por objeto mejorar el comportamiento del convertidor, por ejemplo: reducir las pérdidas de conmutación, incrementar el índice de modulación (MI), incrementar la eficiencia en la conversión, disminuir el contenido armónico (THD), mejorar la respuesta dinámica, etc. Por lo tanto la modulación específica utilizada es muy importante para conseguir un rendimiento óptimo del convertidor.

En los últimos años, la tecnología FACTS (Flexible AC Transmission System) se ha desarrollado con el propósito de la utilización eficiente de la energía, estabilización de voltaje, control de la demanda y mejora en la calidad de red, corrección del factor de potencia y eliminación de armónicos. Algunas aplicaciones adicionales incluyen control de flujo de potencia, regulación de voltaje, compensación de potencia reactiva, mejora de la estabilidad del voltaje transitorio, reducción de la pérdida de potencia, acondicionamiento de potencia y mejora de la calidad, etc.

El uso emergente de la generación renovable y distribuida (DG) ha acelerado y ampliado el papel de los dispositivos electrónicos de potencia para una utilización eléctrica eficiente. Recientemente se ha desarrollado el concepto de smartgrid o red de distribución inteligente, incrementando así el uso y aplicación de los convertidores de potencia. Lo que se traduce en un incremento de la confiabilidad de la red de suministro y una mejora en su rendimiento.

Debido a la importancia actual de estos dispositivos se han desarrollado numerosas estrategias y técnicas modernas de control con diferentes algoritmos de modulación. Aplicaciones de estas técnicas de modulación sobre dispositivos de electrónica de potencia incluyen modelos como: SVC (Static Variable Compensator), Sistemas Fotovoltaicos, STATCOMs (Static Synchronous Compensator), HVDC Converter o SST (Solid-State Transformer), etc.

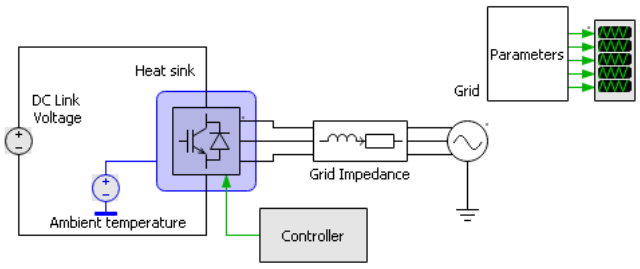


Fig. 1. Diagrama esquemático de un inversor trifásico de 2 niveles con IGBTs. Aplicación del software interactivo SEMIS ABB semiconductor.

Por todo ello, esta serie de conceptos y conocimientos son incluidos dentro del desarrollo curricular del Master de Energías Renovables y Eficiencia Energética (EERR). De este modo cumplir con los objetivos de aprendizaje supone no sólo adquirir los conocimientos transmitidos por el profesor sobre las topologías electrónicas mostradas en el aula, sino también comprender el funcionamiento y uso de los sistemas indicados. Así pues no basta con conocer las diferentes herramientas de simulación disponibles en el mercado, ver fig. 1. De este modo resulta necesario entender de antemano los principios de funcionamiento de los diferentes dispositivos electrónicos, así como los algoritmos y estrategias de modulación PWM más utilizadas en los convertidores de potencia.

Ahora bien, explicar los principios básicos de la modulación PWM en el aula (así como otras técnicas basadas en la modulación Δ/ΣΔ) o desarrollar ejercicios donde los estudiantes puedan apreciar las diferencias de comportamiento entre una y otra técnica suele ser una tarea laboriosa y compleja. Como es lógico, esta dificultad se incrementa exponencialmente en función del nivel de conocimientos previos de los estudiantes. Hay que advertir que la procedencia de los estudiantes en el Master EERR es muy diversa, lo que dificulta sobremanera la transmisión y adquisición de estos conceptos. Entre otros estudios académicos incluyen los grados en ingeniería: eléctrica, electrónica, tecnologías industriales, mecánica, telecomunicaciones, química, etc.

Así el objetivo del presente documento es recoger y mostrar diferentes topologías que expliquen claramente el principio de funcionamiento de estas técnicas de modulación PWM, bien en formato experimental o como ejemplos de simulación. Matlab/Simulink ha sido el software utilizado para el análisis y desarrollo de las diferentes técnicas de modulación PWM. De forma que los estudiantes puedan comprender su significado desarrollando el algoritmo de control y modulación donde se aprecie claramente estos conceptos. Y de esta forma entender, mejor si cabe, su implementación sobre los diferentes sistemas, estructuras y topologías que constituyen los Convertidores Electrónicos de Potencia mencionados.

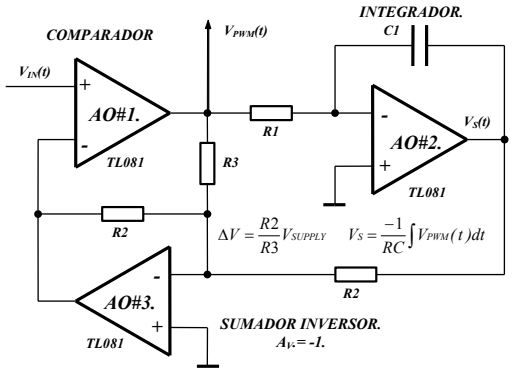


Fig. 2. Ejemplo de circuito analógico para obtener la modulación ΔV (banda de histéresis) mediante el uso de amplificadores operacionales (AO's TL081).

Así pues el presente trabajo presenta un análisis de los principales algoritmos de modulación PWM. Su finalidad es dar un repaso a las diferentes estructuras, enfatizando en las diferentes técnicas y presentando sus características más relevantes. La descripción teórica se centra en el proceso de modulación y se apoya en resultados experimentales o de simulación. El propósito ha sido conseguir un mejor entendimiento del proceso; desde la comparación de una señal de referencia con una o más portadoras, hasta la modulación por banda de histéresis o modulación Δ/ΣΔ, ver figs. 2 y 3. Este trabajo se complementa con una actividad práctica basada en el diseño de moduladores para sistemas de potencia por medio del entorno Matlab/Simulink.

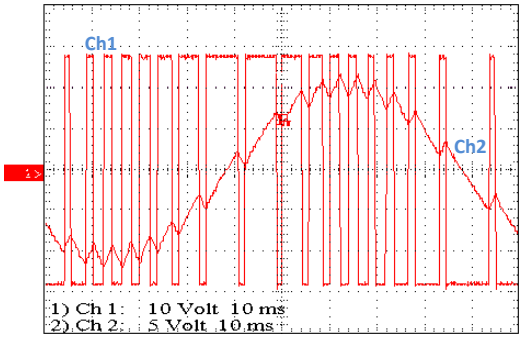


Fig. 3. Representación de las señales de Modulación PWM V_{PWM} (Ch1) y salida del integrador V_S (Ch2). En el oscilograma Ch2 se puede observar la banda de histéresis ΔV sobre la señal de entrada senoidal V_{in}.

II. Estado del Arte.

Con el desarrollo de nuevos algoritmos de control, técnicas y estrategias de modulación PWM se ha podido mejorar el rendimiento y eficiencia de las topologías de convertidores de potencia. De este modo Antonio-Ferreira et al. [1] presentan una revisión de las diferentes técnicas de modulación aplicadas sobre un convertidor multinivel modular (MMC). Este tipo de convertidor es una tecnología de inversor razonablemente joven con un futuro prometedor en sistemas de distribución DC de media tensión (MVDC). El trabajo académico proporciona una revisión exhaustiva de las técnicas basadas en portadora con modulación (CB-PWM) propuestas para ser aplicadas en versiones previas de inversores multinivel.

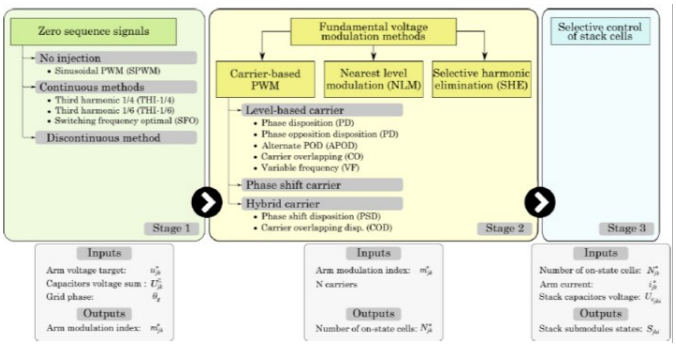


Fig. 4. Diferentes técnicas de modulación (métodos continuos y discontinuos) y etapas en el proceso de diseño.

Otros autores como Hassan et al. [2], Prabaharan et al. [3] o Kava et al. [4] presentan una revisión de diferentes topologías de convertidor multinivel, clásicas e híbridas, para su

implementación en sistemas de energías renovables (RES). De igual forma examinan las diferentes técnicas de modulación adoptadas. Así es posible analizar los conceptos básicos correspondientes a los diferentes convertidores: Neutral-Point Clamped (NPC), Flying Capacitor, Cascaded H-Bridge (CHB) y Modular Multilevel Converter (MMC). Estas topologías han recibido una gran atención debido a sus características más relevantes, entre las que destacan: una mejora en la calidad de la forma de onda, un pequeño voltaje de modo común y una corriente de entrada con baja distorsión. Entre sus aplicaciones podemos destacar: accionamientos de alta potencia en media tensión, filtros de potencia activa, microgrids, control de flujos de potencia, vehículo eléctrico, etc.

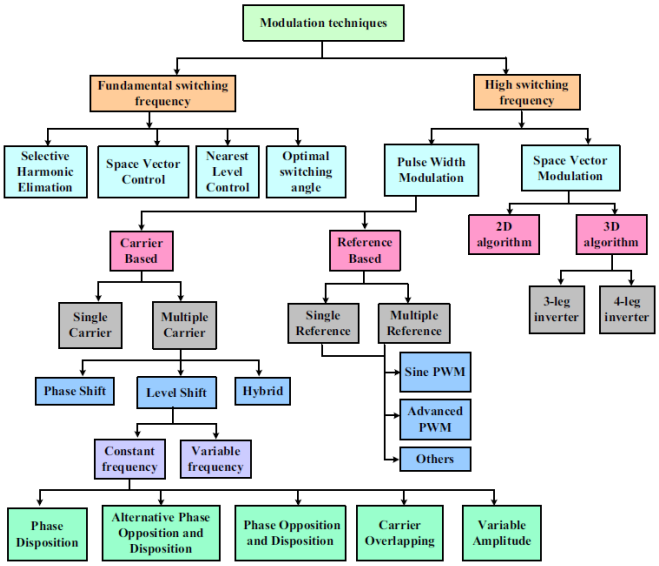


Fig. 5. Diagrama esquemático que presenta diferentes técnicas de modulación PWM para convertidores de potencia.

Las técnicas de modulación son una parte crucial para el inversor porque están relacionadas con la eficiencia general de todo el sistema. Diferentes tipos de técnicas de modulación han sido propuestas en la literatura académica, ver fig. 5. McGrath et al. [5] y Chen & Zhao [6] analizan distintas estrategias de modulación proponiendo compensaciones y modificaciones sobre las mismas en función de la aplicación. Otros autores como Asiminoaei et al. [7], Nguyen et al. [8] o Prieto et al. [9] estudian técnicas de modulación discontinua DPWM para minimizar las pérdidas de conmutación en cualquier punto de operación. De este modo presentan los conceptos asociados a la modulación discontinua de acuerdo a la inyección de la señal de secuencia cero (ZSS).

La selección de la estrategia de modulación depende del grado de linealidad deseado, del rango de modulación, de la calidad en la forma de onda y de su implementación numérica sobre el microcontrolador μC. Así Hava et al. [10] investigan las características de ganancia de tensión y la calidad de onda en la región de sobremodulación. También desarrollan una pequeña revisión de los métodos PWM basados en portadora CB-PWM comparando el índice de modulación (MI) para cada supuesto analizado. Por otro lado Madorell et al. [11], Rus et al. [12] y Artal-Sevil et al. [13] han estudiado estrategias de control destinadas a accionamientos de bajo coste. Diferentes tipos de técnicas de modulación PWM continua y discontinua son implementadas. Estas estrategias se evalúan y comparan para cada aplicación específica a fin de definir cuál de ellas obtiene un mejor rendimiento del convertidor.

Las estructuras multinivel (MLI) se utilizan cada vez más en aplicaciones de media y alta potencia (FACTs) debido a las bajas interferencias electromagnéticas (EMI) y bajo contenido armónico. Así Babaei et al. [14], Venkataramanaiah et al. [15] o Colak et al. [16] presentan una revisión de las diferentes topologías del inversor multinivel (VSI). Algunos esquemas de control también son incluidos. La selección de topología y técnicas de control puede variar de acuerdo con las demandas de potencia del inversor.

De este modo se han estudiado métodos de modulación basados en portadora (SPWM), modulación con eliminación de armónicos (SHE), space-vector (SVM), modulación Δ/ΣΔ, etc. Las ventajas y limitaciones de cada topología también han sido mencionadas. En los documentos se efectúa una comparación entre el número de dispositivos electrónicos necesarios en cada una de las estructuras presentadas (configuración simétrica, asimétrica, híbrida o celda básica) en función del número de niveles del inversor. Los inversores multinivel presentan como principal desventaja el elevado número de dispositivos semiconductores que necesitan. De este modo el objetivo de estos documentos ha sido, en muchos de los casos, presentar estructuras con las mismas prestaciones pero con un número reducido de dispositivos.

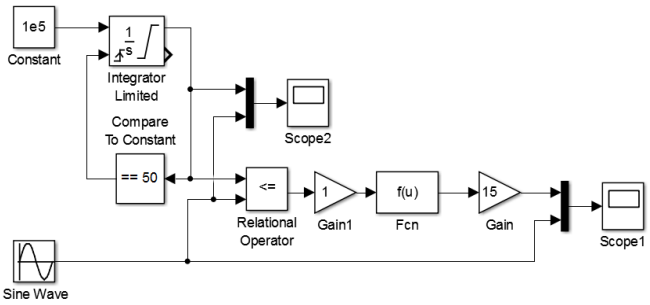


Fig. 6. Diagrama de bloques del modulador PWM. Modulación mediante portadora en diente de sierra (CB-PWM).

III. Fundamentos de las Técnicas de Modulación.

En general un inversor es un sistema que genera una señal senoidal con amplitud y/o frecuencia variable a partir de varias fuentes DC. La secuencia de conmutación de los diferentes interruptores que integran cada topología de inversor viene impuesta por el algoritmo de modulación y control [17]. En la actualidad existen distintas técnicas de modulación PWM aplicadas al control de los convertidores. En este documento se presentan algunas estrategias junto con un pequeño análisis de los algoritmos de modulación PWM. Así el desarrollo teórico está basado en el proceso de modulación y apoyado en los resultados obtenidos en la simulación Matlab/Simulink. El

objetivo ha sido facilitar el entendimiento del proceso a los estudiantes. Dentro de la técnica de modulación PWM se han propuesto diferentes algoritmos de modulación, cada uno con el propósito de incorporar mejoras, como por ejemplo: disminuir las pérdidas de conmutación o el contenido armónico (THD), aumentar la eficiencia del convertidor, reducir la distorsión de la señal, etc. [18], [19].

A. Modulación basada en portadora (CB-PWM)

En este supuesto las señales de control de los dispositivos se obtienen mediante la comparación entre la señal portadora (triangular o diente de sierra) y la señal de referencia (en la mayoría de las ocasiones senoidal de baja frecuencia SPWM), ver fig. 7. La señal portadora es periódica y su frecuencia suele estar determinada por la velocidad de conmutación de los dispositivos semiconductores o el nivel de pérdidas [20]. Una alta relación de frecuencias permite obtener un gran número de pulsos por periodo de señal fundamental.

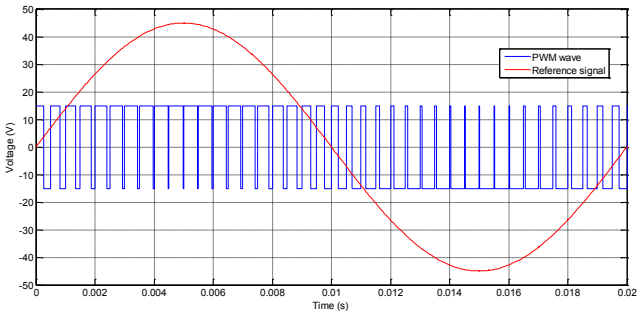


Fig. 7. Señal PWM y señal senoidal de referencia. Supuesto de modulación mediante portadora en diente de sierra (CB-PWM). Valor de pico de la señal portadora $\hat{u}_{tw} = 50V$.

Una característica importante en la modulación PWM es el índice de modulación de amplitud (MI). Se define como el cociente entre la amplitud de la señal de referencia A_w con respecto a la amplitud de la portadora $\hat{u}_{tw}$.

$$MI = \frac{A_w}{\hat{u}_{tw}} \qquad (1)$$

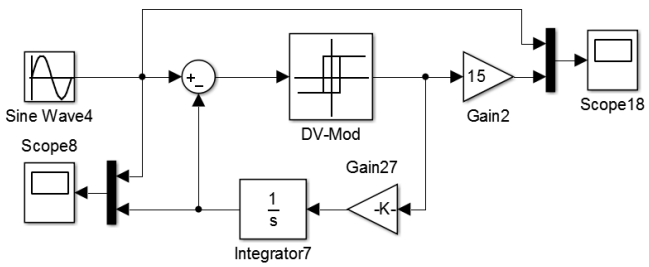


Fig. 8. Diagrama de bloques del modulador ΔV (banda histéresis).

En el modo de operación lineal la amplitud de la señal de referencia A_w es menor o igual al valor de pico de la señal triangular portadora $\hat{u}_{tw}$, $MI \leq 1$. Mientras que en modo no lineal la amplitud de la señal moduladora es superior a la señal portadora, $MI > 1$. Este modo de operación es conocido como sobremodulación; de forma que el número de pulsos obtenidos es inferior. En general el método de modulación senoidal SPWM es una técnica simple que proporciona buenos resultados, incluido en modo sobremodulación y por lo general presenta un bajo contenido armónico. Ello es debido a que opera a frecuencia constante. Hava et al. [10] han investigado la sobremodulación y la calidad de onda generada mediante métodos PWM basados en portadora. Los resultados obtenidos fueron testeados sobre un inversor VSI.

B. Modulación ΔV (banda histéresis)

La técnica de modulación delta ΔV o banda de histéresis es un método de control de realimentación instantánea, ver fig. 8. En este método de modulación se deja que una onda triangular oscile dentro de la banda de histéresis predefinida por ΔV. Esta banda de histéresis está situada por encima y debajo de la onda de referencia, ver oscilograma de la fig. 10.

La función de conmutación PWM es generada a partir de la intersección de los límites superior e inferior $A_w \pm \Delta V$ con los vértices de la onda moduladora, ver figs. 9 y 10. Así pues si se modifica la frecuencia o amplitud de la forma de onda de referencia, manteniendo constante la pendiente, se obtiene como resultado un número mayor o menor de pulsos alterando de este modo la resolución. Así pues, con una banda ΔV pequeña se incrementa el número de pulsos PWM obtenidos (frecuencia de muestreo) y disminuye el rizado.

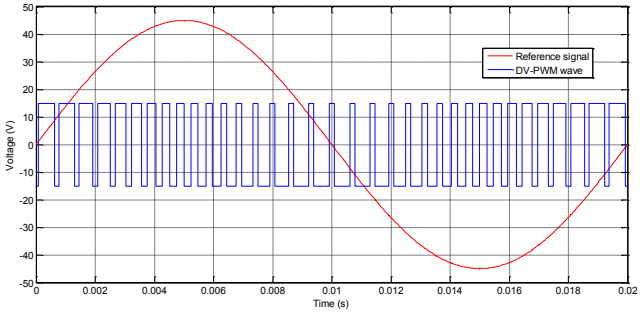


Fig. 9. Señal PWM y señal senoidal de referencia. Supuesto de modulación por banda de histéresis (ΔV-PWM).

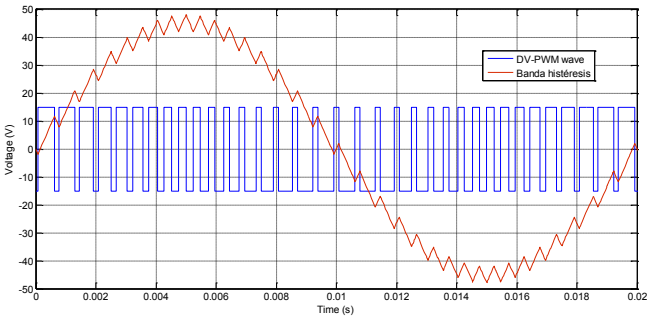


Fig. 10. Señal PWM obtenida y la banda de histéresis ΔV sobre la señal senoidal de referencia.

C. Modulación ΣΔ

La modulación sigma-delta (ΣΔ-PWM) es un tipo de conversión analógica-digital de bajo coste implementada en gran cantidad de circuitos analógicos. Las diferencias a nivel conceptual entre los moduladores tradicionales y los basados

en modulación ΣΔ dificultan su aplicación en metodologías de diseño. Un convertidor de primer orden está compuesto por un integrador, un bloque de muestreo y un cuantificador de 1-bit. Este modulador convierte la señal de entrada en un tren de pulsos cuya media temporal es proporcional a la tensión de entrada. El principio de funcionamiento está dado en el diagrama mostrado en la fig. 11.

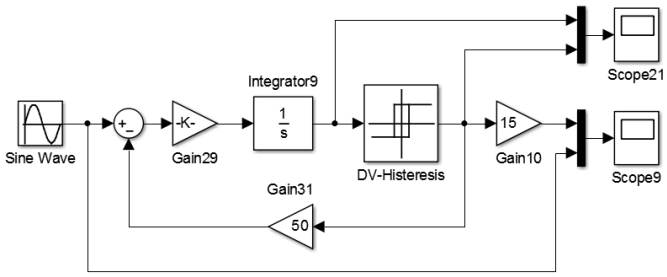


Fig. 11. Diagrama de bloques del modulador ΣΔ-PWM desarrollado en Matlab-Simulink.

Así las figs. 12 y 13 muestran el procesado de la señal de referencia desarrollado por los diferentes bloques del sistema. El modulador recibe la señal de referencia de magnitud variable y es comparado con los pulsos de salida. El error resultante (operación delta) es integrado (operación sigma).

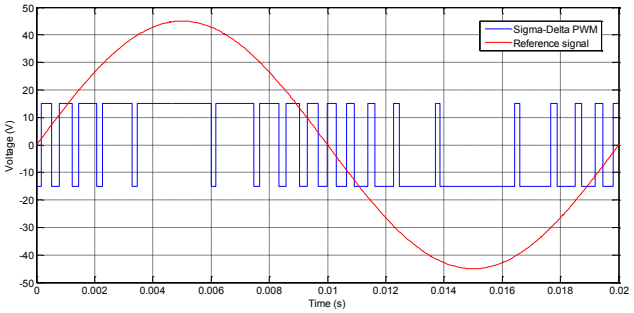


Fig. 12. Señal PWM y señal senoidal de referencia. Supuesto de modulación sigma-Delta ΣΔ-PWM.

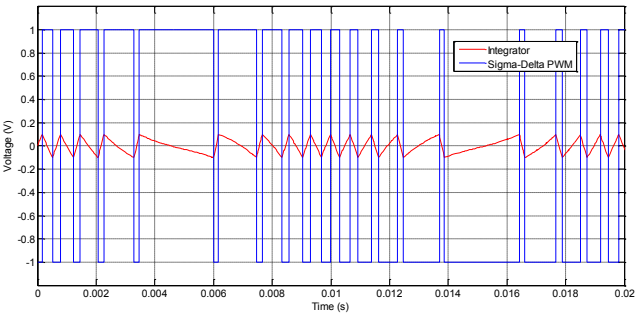


Fig. 13. Modulación ΣΔ-PWM junto con la señal de salida del integrador. La amplitud de la señal del integrador indica la banda de histéresis.

D. Inyección del tercer armónico (THIPWM)

La modulación PWM con inyección del tercer armónico THIPWM (Third Harmonic Injection) es una técnica de modulación continua basada en la incorporación de una señal armónica sobre el voltaje de modulación en los convertidores trifásicos. El principal objetivo es maximizar el uso del bus de continua DC. De este modo es posible incrementar la tensión de salida del inversor hasta un 15,5% con respecto a la técnica SPWM. Hace más de una década algunos autores propusieron inyectar una señal de secuencia cero (ZSS) con una frecuencia superior de la onda fundamental $3\omega_s$ y una amplitud 1/6. Esta técnica de modulación es conocida como THIPWM1/6, su diagrama desarrollado en Matlab/Simulink es mostrado en la fig. 14. De este modo, la señal senoidal de secuencia cero inyectada viene expresada por la siguiente ecuación.

$$v_{ZSS} = \frac{A_w}{6}\sin(3w_s t) \qquad (2)$$

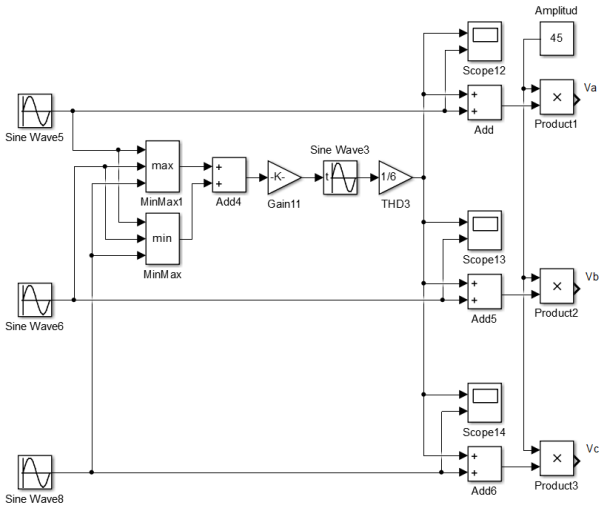


Fig. 14. Diagrama de bloques del modulador THIPWM1/6.

En este supuesto la señal de referencia, con la inyección del 3 armónico, es la suma de las dos ondas senoidales, ver fig. 15. Esta reducción en la amplitud de la señal de referencia permite hacer uso de mayores índices de modulación MI > 1 sin entrar en conflicto con la región de sobremodulación. Para el caso de la modulación THIPWM1/6, el valor lineal máximo viene dado por $MI_{max} = 1{,}15$.

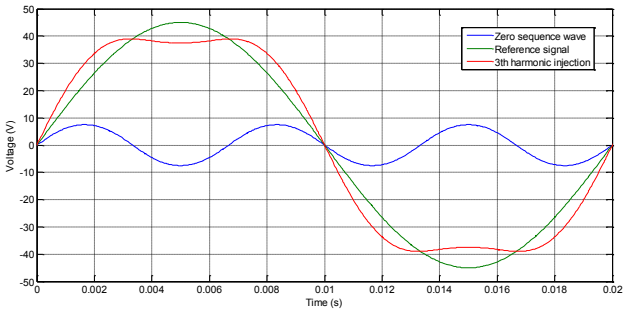


Fig. 15. Generación de la señal considerada como referencia mediante la inyección de una onda de secuencia cero. Modulación THIPWM1/6.

La señal obtenida puede incorporarse como referencia en cualquiera de los diagramas vistos en los epígrafes anteriores. El oscilograma de la fig. 16 muestra la señal THIPWM1/6 como resultado de utilizar el diagrama de modulación basado en portadora (CB-PWM) con diente de sierra. Esta técnica

resulta ventajosa por el incremento en el rango de modulación lineal. Al tratarse de un inversor trifásico el efecto del tercer armónico sobre la carga se ve atenuado.

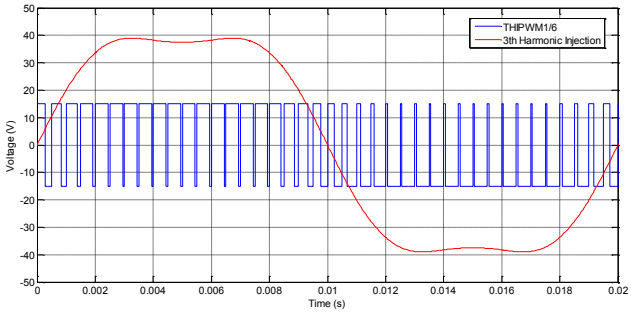


Fig. 16. Modulación PWM y señal senoidal de referencia Va con inyección del tercer armónico. Supuesto de modulación THIPWM1/6.

E. Modulación Space-Vector (SVM)

Esta estrategia denominada SVM es comúnmente utilizada en convertidores trifásicos asociados con aplicaciones AC relacionadas con variadores de velocidad. Para extender el rango lineal de la modulación SPWM puede ser inyectada una señal de secuencia cero (en este supuesto una señal ZSS triangular). La amplitud de la onda triangular es ahora 1/4 de la magnitud de la señal senoidal deseada. El rango de modulación también se amplía un 15% en comparación con la técnica SPWM. La fig. 17 muestra la señal de referencia resultante, tras la inyección de la onda triangular, junto con el tren de pulsos obtenido al utilizar un modulador PWM.

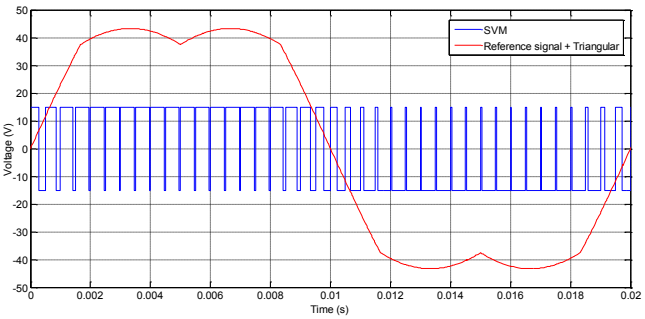


Fig. 17. Ejemplo de modulación SVM y señal de referencia Va con inyección de onda triangular (amplitud ¼).

F. Modulación PWM Discontinua (DPWM)

Una de las técnicas más importantes en la actualidad es la modulación PWM Discontinua (DPWM). Existen varios tipos de algoritmos que poseen en común la inyección de una señal de secuencia cero (ZSS). En los convertidores trifásicos, estas señales de secuencia cero se pueden agregar en la modulación con el propósito de mejorar su rendimiento. Esta estrategia permite aumentar el rango lineal del índice de modulación en el convertidor. A su vez, los armónicos incorporados se cancelan en las tensiones de línea. Su principal objetivo es la reducción de las pérdidas de conmutación en los dispositivos electrónicos que conforman la topología del inversor. Esto es posible ya que por lo general estos sistemas sólo realizan conmutaciones en 2/3 del ciclo de la señal, ver distintos tipos en las figs. 19 a 22.

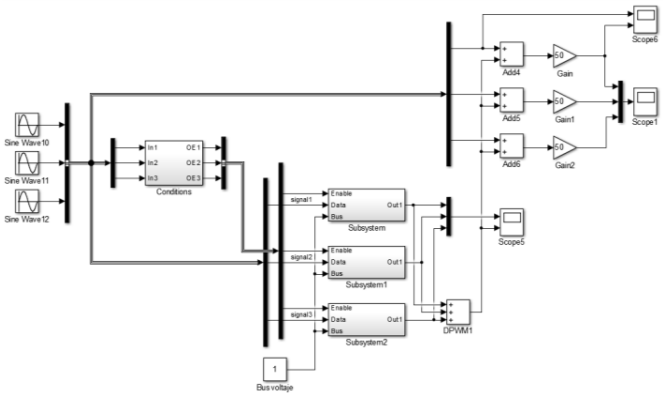


Fig. 18. Diagrama de bloques del modulador DPWM desarrollado mediante el software Matlab/Simulink.

La fig. 18 muestra el diagrama de bloques del modulador DPWM implementado en Matlab/Simulink. La diferencia entre las diferentes técnicas analizadas radica en el algoritmo usado para la obtención de la señal ZSS. Esta función matemática se encuentra incorporada dentro del bloque “conditions”.

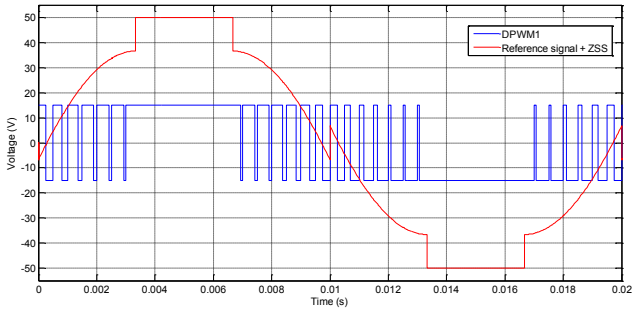


Fig. 19. Ejemplo de modulación DPWM1 y señal de referencia con inyección de onda de secuencia cero (ZSS).

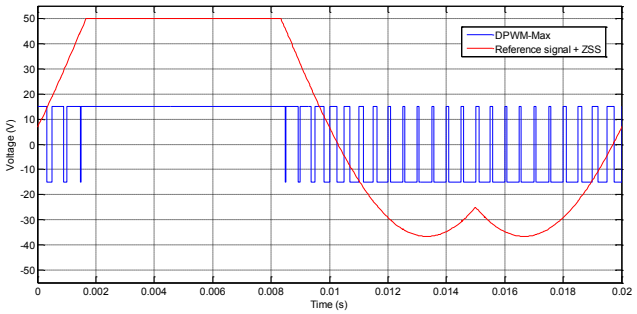


Fig. 20. Ejemplo de modulación DPWM-Max y señal de referencia con inyección de onda de secuencia cero (ZSS).

La literatura académica recoge distintos tipos de algoritmos discontinuos, entre los que se puede destacar: DPWM0, DPWM1, DPWM2, DPWM3, DPWM-Max, DPWM-Min, etc. Algunos de los cuales están representados en las siguientes figuras. La señal de secuencia cero generada se caracteriza por ser periódica del triple de la frecuencia fundamental y además discontinua. Esta señal es obtenida a través del sumador que conecta la salida de cada uno de los subsistemas en la fig. 18. En los oscilogramas mostrados puede apreciarse la onda senoidal de referencia con la inyección de la señal de secuencia

cero junto con el DPWM obtenido al utilizar un modulador PWM (CB-PWM).

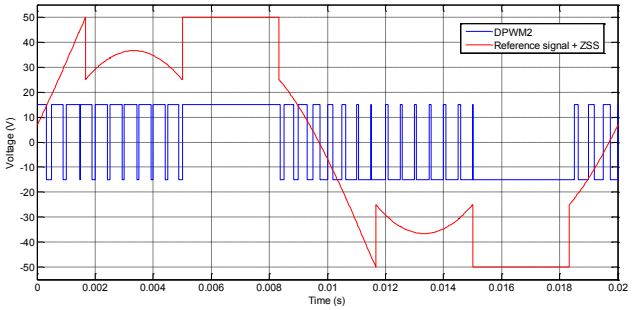


Fig. 21. Ejemplo de modulación DPWM2 y señal de referencia con inyección de onda de secuencia cero (ZSS).

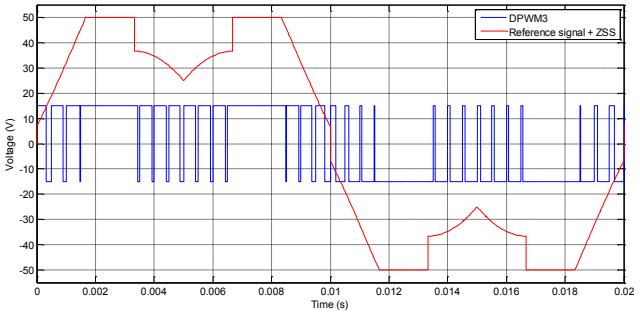


Fig. 22. Ejemplo de modulación DPWM3 y señal de referencia con inyección de onda de secuencia cero (ZSS).

De entre las diferentes estrategias de modulación DPWM mostradas, suelen implementarse aquellos métodos que son simétricos y que por tanto producen las mismas pérdidas en los dispositivos superiores e inferiores del convertidor.

G. Modulación PWM con Múltiple Portadora

Este tipo de estrategias son aplicadas principalmente en los convertidores multinivel NPC (Neutral Point Clamped) y FC (Flying Capacitor). Los niveles de ondas portadoras pueden estar en disposición de fase (PD), oposición de fase (POD), oposición de fase alternada (APOD), etc., ver diagrama en fig. 5. Las portadoras poseen la misma amplitud y frecuencia pero están ubicadas a diferentes niveles. En esta última década, varios estudios académicos han analizado el espectro armónico generado por estos diferentes métodos de modulación [21].

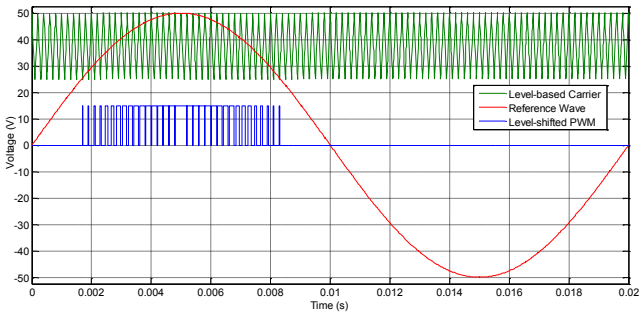


Fig. 23. Señal senoidal de referencia y portadora triangular multinivel. Como resultado se obtiene la señal de disparo PWM del IGBT.

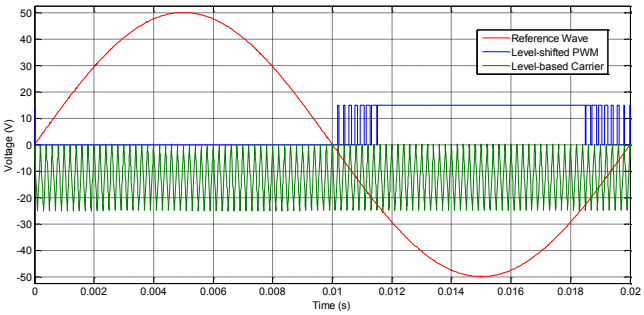


Fig. 24. Señal senoidal de referencia y portadora triangular multinivel. Como resultado se obtiene la señal de disparo PWM del IGBT.

En las figs. 23 y 24 se puede observar la señal senoidal de referencia, junto con la portadora triangular a distintos niveles. También se ha representado la señal de disparo de los IGBTs resultante de la modulación PWM con múltiple portadora. Estas señales están destinadas al control de un convertidor del tipo 5L-NPC. La fig. 25 muestra los 5 niveles del inversor.

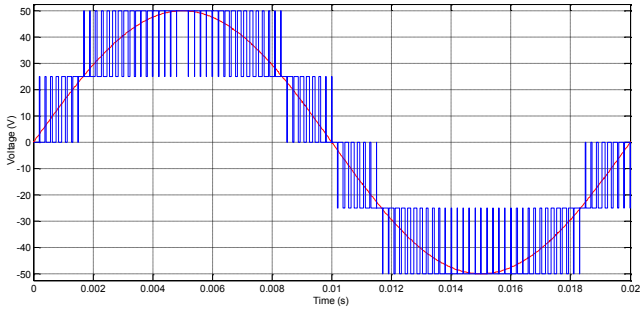


Fig. 25. Niveles de salida deseados en el inversor 5L-NPC.

IV. CONCLUSIONES.

El documento presentado ha proporcionado una revisión comparativa de diferentes técnicas de modulación PWM. De este modo además de los principios fundamentales también han sido señalados los recientes desarrollos. Además se ha comprobado que tanto los algoritmos continuos como los discontinuos precisan de pocos cálculos matemáticos, por lo que resulta sencillo su simulación mediante Matlab/Simulink o incluso programar las diferentes técnicas en µC's o DSP's.

El impacto de la distorsión armónica, la eficiencia y rendimiento del convertidor también han sido mencionados. Al analizar los diferentes escenarios de modulación, se puede concluir que la selección de la técnica de modulación adoptada depende en gran medida del factor que requiera una mayor optimización. En general, el tipo de modulación es el responsable de generar un bajo contenido de armónicos en las corrientes de la red así como, generar menos pérdidas de potencia en los dispositivos. Finalmente las técnicas de modulación PWM de base discontinua con inyección se señal de secuencia cero (ZSS) son las soluciones que reducen los eventos de conmutación y las pérdidas de potencia correspondientes a los dispositivos semiconductores. Estas estrategias han permitido optimizar la capacidad de control y facilitar también su manejo.

El propósito ha sido cumplir los objetivos de aprendizaje; lo que supone no sólo adquirir los conocimientos transmitidos por el profesor sobre las topologías electrónicas mostradas en el aula sino también comprender el funcionamiento y uso de estos sistemas. Para ello resulta necesario conocer los algoritmos y técnicas de modulación PWM más utilizadas en los convertidores de potencia. Evaluar satisfactoriamente las competencias, habilidades y destrezas adquiridas por los estudiantes durante su proceso de formación universitaria también ha sido otro de los objetivos marcados al inicio de la experiencia. Como resultado se ha observado un incremento en el interés y grado de motivación del estudiante durante el estudio y desarrollo de pequeñas actividades académicas relacionadas.

Por último las simulaciones realizadas han proporcionado un nuevo punto de vista al estudiante. Le han permitido comprender cada una de las estrategias o técnicas de modulación, así como observar las ventajas e inconvenientes de los algoritmos presentados. Con el desarrollo de las diferentes simulaciones ha conseguido al mismo tiempo profundizar en los contenidos y coger soltura en el desarrollo de los modelos. Los alumnos han podido comprender de forma más visual los diferentes conceptos expuestos en el aula al mismo tiempo que avanzaban en el desarrollo de las diferentes actividades académicas. Por otro lado el profesor ha obtenido un feedback más real e instantáneo. De esta forma, como conclusión los objetivos iniciales de aprendizaje se han podido resolver de manera satisfactoria.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Universidad de Zaragoza para el desarrollo del presente trabajo, a través del Programa de Innovación e Investigación Educativa (PIIDUZ 2017/18). Referencia de Proyecto: PIIDUZ_17_059.

REFERENCIAS

[1] A. Antonio-Ferreira, C. Collados-Rodríguez and O. Gomis-Bellmunt. Modulation techniques applied to medium voltage modular multilevel converters for renewable energy integration: A review. *Electric Power Systems Research, Elsevier ScienceDirect*. Volume 155, February 2018, pp. 21-39.

[2] N.S. Hasan, N. Rosmin, D.A.A. Osman and A.H. Musta'amal@Jamal. Reviews on multilevel converter and modulation techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier ScienceDirect*. Volume 80, pp.: 163-174, December 2017.

[3] N. Prabaharan and K. Palanisamy. A comprehensive review on reduced switch multilevel inverter topologies, modulation techniques and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier ScienceDirect*. Volume 76, pp.: 1248-1282, September 2017.

[4] P. Kala and S. Arora. A comprehensive study of classical and hybrid multilevel inverter topologies for renewable energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier ScienceDirect*. Volume 76, pp.: 905-931, September 2017.

[5] B.P. McGrath and D.G. Holmes. Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics. IEEExplore Digital Library.* Vol.: 49, issue: 4; pp.: 858-867, 2002.

[6] H. Chen and H. Zhao. Review on Pulse-Width Modulation strategies for common-mode voltage reduction in three-phase voltage-source inverters. *IET Power Electronics. IEEExplore Digital Library*. Vol.: 9, issue: 14; pp.: 2611-2620, 2016.

[7] L. Asiminoaei, P. Rodríguez and F. Blaabjerg. Application of Discontinuous PWM Modulation in Active Power Filters. *IEEE Transactions on Power Electronics, IEEExplore Digital Library*. Volume: 23, issue: 4; pp.: 1692-1706, 2008.

[8] T.D. Nguyen, J. Hobraiche, N. Patin, G. Friedrich and J.P. Vilain. A Direct Digital Technique Implementation of General Discontinuous Pulse Width Modulation Strategy. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, IEEExplore Digital Library*. Volume: 58, issue: 9 pp. 4445-4454, 2001.

[9] J. Prieto, M. Jones, F. Barrero, E. Levi and S. Toral. Comparative Analysis of Discontinuous and Continuous PWM Techniques in VSI-Fed Five-Phase Induction Motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics. IEEExplore Digital Library.* Vol.: 58, issue: 12; pp.: 5324-5335, 2011.

[10] A.M. Hava, R.J. Kerkman and T.A. Lipo. Carrier-based PWM-VSI Overmodulation strategies: analysis, comparison and design. *IEEE Transactions on Power Electronics, IEEExplore Digital Library.* Vol.: 13, issue: 4; pp. 674-689, 1998.

[11] R. Madorell, J. Pou, J. Zaragoza, P. Rodriguez and R. Pindado. Modulation Strategies for a Low-Cost Motor Drive. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics. IEEExplore Digital Library.* July 2006. Montreal, Canada. Vol.: 2; pp.: 1492-1497.

[12] D.C. Rus, N.S. Preda, I.I. Incze, M. Imecs and Cs. Szabó. Comparative analysis of PWM techniques: Simulation and DSP implementation. *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR'10). IEEExplore Digital Library*. May 2010, Romania. Vol.: 3, pp.: 1-6.

[13] J.S. Artal-Sevil, R. Dufo, J.L. Bernal-Agustín and J.A. Domínguez. Asymmetrical multilevel inverter with staircase modulation for variable frequency drives in fractional horsepower applications. *17th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE-ECCE'15 Europe*. *IEEExplore Digital Library.* September 2015. Geneva; Switzerland; pp.: 1-10.

[14] E. Babaei and S.H. Hosseini. New cascaded multilevel inverter topology with minimum number of switches. *Energy Conversion and Management. Elsevier ScienceDirect.* Volume 50, issue 11; pp.: 2761-2767, November 2009.

[15] J. Venkataramanaiah, Y. Suresh, A. Kumar Panda. A review on symmetric, asymmetric, hybrid and single DC sources based multilevel inverter topologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews. *Elsevier ScienceDirect*. Volume 76; pp.: 788-812, September 2017.

[16] I. Colak, E. Kabalci and R. Bayindir. Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes. *Energy Conversion and Management. Elsevier ScienceDirect*. Vol. 52, issue 2; pp.: 1114-1128, February 2011.

[17] A.M. Mahfuz-Ur-Rahman, Md. Mazharul Islam and Md. Rabiul Islam. Performance analysis of modulation techniques in multilevel inverters for direct grid connected photovoltaic arrays. *9th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE'16). IEEExplore Digital Library.* December 2016, Bangladesh; pp.: 66-69.

[18] M.C. Di Piazza and M. Pucci. Techniques for efficiency improvement in PWM motor drives. *Electric Power Systems Research. Elsevier ScienceDirect*. Volume 136, pp.: 270-280, July 2016.

[19] Y. Ko, M. Andresen, G. Buticchi, J.S. Lee and M. Liserre. Modulation strategy for highly reliable cascade H-Bridge inverter based on discontinuous PWM. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC'17). IEEExplore Digital Library.* March 2017. Tampa, Florida (USA). pp.: 3241-3246.

[20] A. Babaie, B. Karami and A. Abrishamifar. Improved equations of switching loss and conduction loss in SPWM multilevel inverters. *7th Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference, PEDSTC'16. IEEExplore Digital Library.* February 2016. Tehran, Iran; pp.: 559-564.

[21] D.A.B. Zambra, C. Rech, F.A.S. Goncalves and J.R. Pinheiro. Power losses analysis and cooling system design of three topologies of multilevel inverters. *IEEE Power Electronics Specialists Conference. IEEExplore Digital Library.* June 2008. Rhodes, Greece; pp.: 4290-4295.

Análisis de Pérdidas de Potencia en un Inversor Trifásico 3L-NPC. Comparación con diferentes Técnicas de Modulación PWM.

J.S. Artal-Sevil, J.M. Lujano-Rojas.
Dpto. Ingeniería Eléctrica.
Escuela de Ingeniería y Arquitectura EINA.
Universidad de Zaragoza. Campus Río Ebro.
María de Luna, 3. Zaragoza, Spain.
email: jsartal@unizar.es; lujano.juan@gmail.com

C. Bernal-Ruiz, I. Sanz Gorrachategui.
Dpto. Ingeniería Electrónica y Comunicaciones.
Escuela de Ingeniería y Arquitectura EINA.
Universidad de Zaragoza. Campus Río Ebro.
María de Luna, 3. Zaragoza, Spain.
email: cbernal@unizar.es; isgorra@unizar.es

***Abstract*— Este trabajo presenta el funcionamiento básico de un convertidor trifásico NPC (Neutral-Point Clamped Converter) de tres niveles, junto con las diferentes técnicas de modulación y control más utilizadas en la literatura académica. El objetivo ha sido desarrollar una comparación entre las pérdidas de conducción y conmutación en los dispositivos semiconductores en función de la técnica de modulación empleada (SPWM, SVM, THIPWM o DPWM). El propósito es analizar de forma gráfica y visual los parámetros de mayor influencia sobre las pérdidas de potencia, así como determinar el conjunto de técnicas que minimizan estas pérdidas sobre los dispositivos. Este documento discute los principales campos de aplicación y presenta algunos problemas tecnológicos asociados. El calentamiento sobre los semiconductores en función de su tecnología de fabricación (Si, SiC) también ha sido presentado. El análisis ha sido desarrollado mediante la herramienta de simulación gratuita Loss Simulation Software de Fuji-Electric. La aplicación utiliza las características específicas de los dispositivos con objeto de mejorar la precisión en el cálculo de las pérdidas. La finalidad es que los estudiantes puedan asimilar más rápidamente los conceptos presentados en el aula. Las pérdidas de potencia asociadas a los semiconductores que constituyen la topología 3L-NPC han sido comparadas. De este modo es más fácil determinar y observar la influencia de diferentes parámetros como la frecuencia de conmutación, índice de modulación, corriente de salida, factor de potencia, resistencia de puerta, etc. sobre la estructura propuesta. Al mismo tiempo los estudiantes aprenden a utilizar la aplicación IGBT Losses Simulation software.**

Keywords—3-level NPC inverter 3L-NPC, power losses calculation, conduction losses, switching losses, PWM modulation techniques, thermal module, symmetric multilevel inverter, efficiency.

I. INTRODUCCIÓN

Los convertidores multinivel son ampliamente utilizados en aplicaciones de alta potencia como accionamiento de motores, filtros activos, convertidores DC/AC y otras muchas aplicaciones. En estos últimos años, diferentes topologías de convertidores de potencia se están implantando en sistemas de generación fotovoltaica, eólica o mini-hidráulica. También se han incorporado en distintos módulos FACTS (Flexible AC Transmission System) destinados a la utilización eficiente de la energía eléctrica. Así Gandoman et al. [1] presentan una revisión de tecnologías FACTs y aplicaciones destinadas a la mejora de la calidad de potencia en smartgrids. Estos sistemas tienen un rol importante en la integración de las fuentes de energías renovables (RES) a la red eléctrica. Así como en la reducción de armónicos ocasionados por cargas no lineales.

La mejora en la estabilidad transitoria y el control de los flujos de potencia en las pequeñas redes de distribución (microgrids) o en sistemas aislados (con o sin almacenamiento de energía), son aplicaciones de gran interés. En estos sistemas los convertidores electrónicos de potencia resultan esenciales. De este modo Zeng et al. [2] analizan diferentes topologías y estrategias de control para la mejora de la calidad de potencia con inversores conectados a la red. Asimismo son presentados varios diagramas y algoritmos utilizados para el control de la potencia y corriente inyectada a la red. Los autores desarrollan un análisis detallado junto con la comparación y discusión de las estructuras mostradas.

Recientemente estos dispositivos han captado la atención como componentes importantes en la generación renovable y distribuida (DG), siendo parte relevante en la integración de los sistemas de energías renovables, ver fig. 1. Por todo ello, esta serie de conceptos y conocimientos han sido incluidos dentro del desarrollo curricular del Master de Energías Renovables y Eficiencia Energética (EERR).

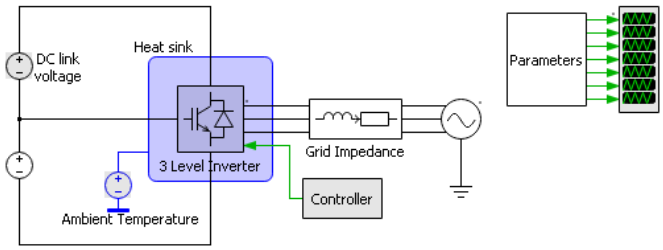


Fig. 1. Diagrama esquemático de un inversor trifásico de 3 niveles (3L-NPC) con IGBTs. Aplicación del software interactivo SEMIS ABB semiconductor.

Los inversores multinivel VSI (Voltage Source Inverter) son muy populares y en función de su topología se pueden clasificar en varias categorías: Neutral-Point Clamped (NPC), Flying Capacitor (FC), Cascaded H-Bridge (CHB) y Modular Multilevel Converter (MMC). En el caso particular de la topología 3L-NPC trifásica la literatura ha propuesto una serie de estrategias de modulación, cada una de las cuales se centra en la optimización de aspectos específicos como la reducción del contenido armónico, disminución de las pérdidas en los dispositivos semiconductores, incremento del rendimiento del convertidor, etc. [3]. Entre las características más relevantes de estos inversores pueden destacarse: la disminución de la distorsión armónica total (THD) en la corriente de salida, la capacidad para operar con cualquier factor de potencia, buena estabilidad, alta eficiencia y el tamaño del convertidor.

La topología NPC (Neutral-Point Clamped converter) de 3 niveles es cada vez más utilizada, pues permite trabajar con potencias elevadas ofreciendo una calidad de onda mejorada [4]. Así en los últimos años se han desarrollado varios estudios relacionados con las pérdidas en convertidores para diferentes tipos de aplicaciones. De este modo Clotea et al. [5] analizan la eficiencia de un pequeño sistema de almacenamiento de energía eólica mediante bombeo. En el estudio se calculan las pérdidas de conducción y conmutación de los semiconductores sobre un convertidor VSI de 2 niveles con la técnica de modulación SVM (space-vector modulation). La estimación teórica es contrastada con la información obtenida en la simulación. Por su parte Lee at al. [6] comparan las pérdidas de potencia de las topologías de un inversor 3L-NPC y 3L-TI. Las pérdidas de potencia fueron calculadas teóricamente y posteriormente comparadas con los resultados obtenidos por medio de la simulación. En este caso el análisis fue efectuado mediante el módulo térmico PSIM. Así determinan que las pérdidas de conducción dependen del índice de modulación (MI) y del factor de potencia (PF) mientras que las pérdidas de conmutación son función de la frecuencia de operación (f_{SW}). Los parámetros utilizados fueron extraídos de los datasheets proporcionados por los diferentes fabricantes de dispositivos semiconductores.

Del mismo modo Babaie et al. [7] y Seung-Wook et al. [8] analizan las pérdidas de potencia en los semiconductores que constituyen la topología 3L-NPC. La estrategia de modulación aplicada fue SPWM y SVM, respectivamente. Los cálculos teóricos estimados fueron contrastados con los resultados obtenidos en la simulación. Se aprecian la misma tendencia en los datos presentados. Las herramientas de simulación usadas por los autores fueron PLECs y PSIM. Mientras que Filsecker et al. [9] efectúan un estudio semejante incorporando en esta ocasión dispositivos de SiC. Comparando los resultados con respecto a los casos anteriores, se aprecia una reducción de las pérdidas en los semiconductores al utilizar esta tecnología. Asimismo Zambra et al. [10] y Soon-Wong et al. [11] analizan la distribución de las pérdidas asociadas a los semiconductores con diferentes técnicas de modulación. En ambos casos han sido utilizados modelos matemáticos para conocer las pérdidas asociadas a los dispositivos. El análisis del circuito térmico y el factor de distorsión armónica (THD) también fueron parámetros considerados por los autores. El propósito ha sido determinar la eficacia en las topologías multinivel mostradas.

Por otra parte Shin et al. [12] presentan una comparación de las pérdidas de potencia en los dispositivos semiconductores para diferentes técnicas de modulación (SPWM y DPWM). Las estructuras analizadas fueron los inversores tipo 3L-NPC y 3L-T. Los cálculos analíticos fueron contrastados con los resultados obtenidos con el software de simulación PSIM. Como conclusión indican que el modelo 3L-T posee menores pérdidas. Mientras Mirizadeh et al. [13] estudian las pérdidas de conducción y conmutación asociadas a diferentes técnicas de modulación PWM aplicadas sobre un inversor multinivel CHB.

De igual forma, Farhadi et al. [14] analizan la eficacia de las técnicas de modulación SPWM, THIPWM y SVM sobre un inversor NPC. Las pérdidas en los dispositivos son evaluadas mediante el software Matlab/Simulink. El análisis térmico es realizado con el propósito de conocer que elemento posee mayor temperatura en la unión $T_j < T_j|_{max}$ y determinar así la fiabilidad de la estructura. Mientras tanto Teichmann et al. [15] evalúan las pérdidas asociadas al convertidor de 2 niveles convencional con respecto al 3L-NPC. El análisis fue llevado a cabo con dispositivos de diferentes fabricantes. Los valores del filtro (L, C) también fueron parámetros a reconsiderar.

En comparación con las estrategias de modulación de anchura de pulso PWM tradicionales, la reducción de las pérdidas de conmutación se logra frecuentemente mediante la adopción de esquemas de modulación discontinua (DPWM). Con esta técnica no sólo se reducen las pérdidas de conmutación sino que se obtienen mejores características armónicas con un índice de modulación alto en comparación con la modulación PWM continua (SPWM, SVM, etc.). El propósito del documento es establecer de manera sencilla una metodología para comparar las pérdidas en los dispositivos semiconductores. El análisis ha sido desarrollado mediante la herramienta de simulación gratuita Loss Simulation Software de Fuji-Electric.

Este documento está organizado de la siguiente manera. La sección 2 indica el cálculo de las pérdidas, la estimación de la temperatura, las estrategias de modulación y la topología. El epígrafe 3 compara las pérdidas en los semiconductores en función de su tecnología. Mientras que la sección 4 compara las pérdidas en función del tipo de técnica de modulación. Finalmente el ítem 5 muestra las conclusiones, indicando las ventajas e inconvenientes de la estrategia implementada.

II. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS

Hoy en día es posible utilizar diferentes herramientas de simulación online gratuitas, proporcionadas por los fabricantes, que permiten estimar las pérdidas de potencia asociadas a los dispositivos semiconductores. En estas aplicaciones es posible seleccionar la topología del convertidor así como los distintos dispositivos a utilizar. Algunos ejemplos de recursos online de

simulación (freeware) de uso generalizado son: "Semis" de ABB Semiconductors, "SemiSel Simulation" de Semikron [16], "Melcosim" de Mitsubishi Electric o "IGBT Simulator" de Fuji Electric [17]. En este caso se ha seleccionado esta última aplicación por su sencillez y facilidad de manejo.

Las pérdidas de potencia se dividen en dos categorías principalmente: pérdidas de conmutación y de conducción. En la literatura se ha demostrado que las pérdidas de conmutación representan la parte más importante al comparar diferentes técnicas de modulación pues son función de la frecuencia de operación (f_{SW}) y de la resistencia de puerta (R_G), entre otros parámetros.

En este documento se presenta un análisis sobre estas pérdidas de potencia para diferentes estrategias de modulación y tecnologías de los dispositivos. La estructura analizada ha sido el convertidor trifásico 3L-NPC. El propósito es estimar y posteriormente comprobar de forma gráfica, los diferentes parámetros que influyen sobre estas pérdidas y de esta forma asimilar y asentar los conocimientos.

A. Modo de operación del 3L-NPC

En este apartado se presenta la topología y el modo de operación del inversor. Este tipo de convertidores producen n niveles de tensión en su salida y están constituidos por (n-1) condensadores, 2(n-1) IGBTs y (n-1)(n-2) diodos por cada rama. La estructura del inversor 3L-NPC trifásico analizado es mostrada en la fig. 2. Debido a la simetría existente en su diseño se han estimado las pérdidas de potencia asociadas a los dispositivos semiconductores de un solo brazo. La tabla I muestra los distintos estados y niveles de tensión de salida del inversor 3L-NPC.

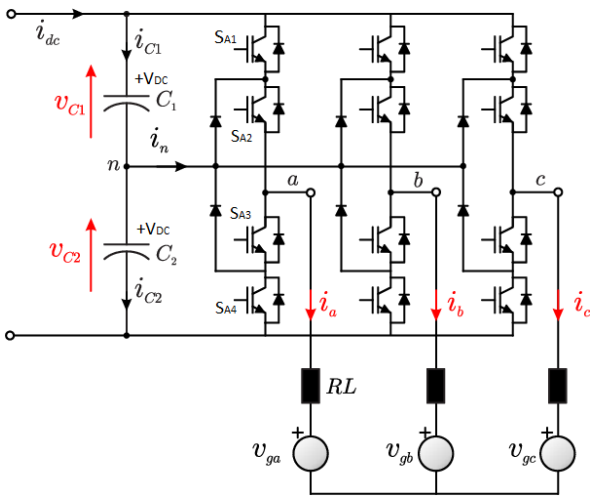


Fig. 2. Ejemplo de la topología 3L-NPC analizada.

TABLA I. DIFERENTES ESTADOS Y NIVELES DE TENSIÓN DEL 3L-NPC.

Number State	Switching state				v_O
	S_{1A}	S_{2A}	S_{3A}	S_{4A}	
1	1	1	0	0	$+V_{DC}$
2	0	1	1	0	0
3	0	0	1	1	$-V_{DC}$

Matlab/Simulink ha sido el software utilizado para simular el modo de operación del inversor. Las señales de disparo de los IGBTs son obtenidas como resultado de las intersecciones entre las señales portadoras triangulares y la señal de referencia V_R. Las figs. 3 y 4 representan los pulsos de control de los diferentes IGBTs de la estructura. En este supuesto se ha usado la estrategia de modulación SPWM.

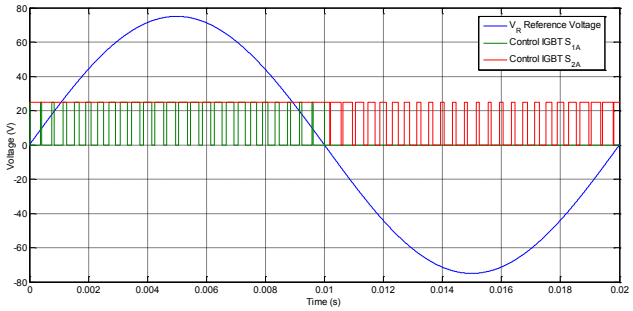


Fig. 3. Obtención de los pulsos de Control del IGBT S_{1A} y S_{2A}.

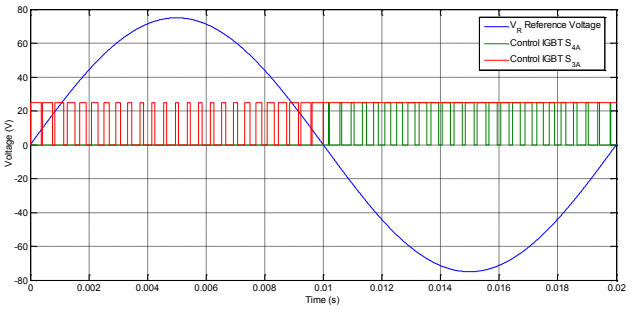


Fig. 4. Obtención de los pulsos de Control del IGBT S_{3A} y S_{4A}.

Por otra parte, la corriente de salida en las fases del inversor 3L-NPC es mostrada en la fig. 5. En este supuesto se ha considerado una frecuencia de conmutación $f_{SW} = 10$kHz y $i_O|_{rms} = 7{,}071$A. También es posible apreciar el pequeño rizado que aparece sobre la corriente trifásica de salida. Datos del filtro de salida utilizado: $R_F = 10\Omega$; $L_F = 3{,}5$mH.

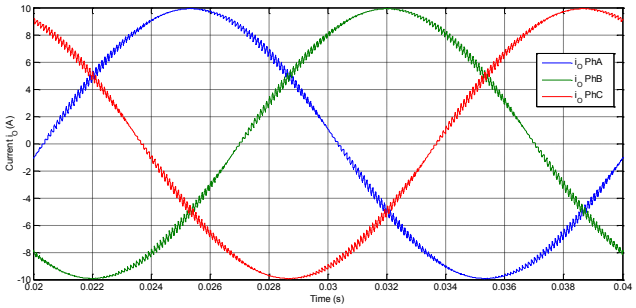


Fig. 5. Formas de onda de la corriente de salida i_O del inversor.

B. Pérdidas de Conducción

Las pérdidas en conducción en el IGBT están asociadas con la caída de tensión en el dispositivo (v_{CE}), duty cycle (D) y la corriente de colector (i_C). Como ejemplo la fig. 6 muestra la variación del parámetro $v_{CE} = f(v_{GE}; i_C)$ en el dispositivo 2MBI400VE-170. El diagrama está recogido en la hoja de

características del dispositivo. Las pérdidas de conducción del IGBT ($P_{CON,\,IGBT}$) se calculan mediante la ecuación (1).

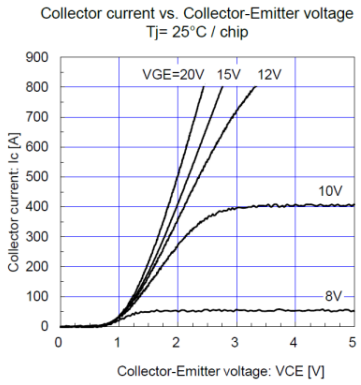


Fig. 6. Tensión v_{CE} en el IGBT en función de la tensión de control v_{GE} y la corriente i_C. Datos: $v_{GE(th)} = 6{,}5V$; $r_{CE} = 2{,}5m\Omega$; $C_{ies} = 38nF$.

$$P_{CON,IGBT} = v_{CE} i_{C(on)} D + r_{CE} i_{C(on),rms}{}^2 D \tag{1}$$

A su vez las pérdidas de conducción en el diodo ($P_{CON,\,D}$) están relacionadas con la temperatura de la unión (T_j), la caída de tensión (v_F), duty cycle (D) y la corriente (i_D). La ecuación (2) recoge este parámetro.

$$P_{CON,D} = v_F i_F D + r_D i_{F,rms}{}^2 D \tag{2}$$

C. *Pérdidas de Conmutación*

Las pérdidas de conmutación en los dispositivos IGBTs están constituidas por las pérdidas de encendido "on" ($P_{ON|SW}$) y apagado "off" ($P_{OFF|SW}$). Estas pérdidas están relacionadas con la frecuencia de conmutación (f_{SW}), la corriente (i_C), la tensión del bus DC ($+V_{CC}$) y la resistencia de puerta (R_G). Como se muestra en la fig. 7, las pérdidas de conmutación se producen en los instantes del cruce de tensión y corriente. Las pérdidas de conmutación de los IGBTs se calculan mediante la ecuación (3) y (4), donde $E_{ON}|_{ref}$, $E_{OFF}|_{ref}$, $i_C|_{ref}$ e $v_{CE}|_{ref}$ son parámetros de referencia en las hojas de datos del dispositivo.

$$P_{SW}\big|_{on} = E_{ON} \times f_{SW} = E_{ON}\big|_{ref} \times \frac{i_C}{i_C\big|_{ref}} \times \frac{v_{CE}}{v_{CE}\big|_{ref}} \times f_{SW} \tag{3}$$

$$P_{SW}\big|_{off} = E_{OFF} \times f_{SW} = E_{OFF}\big|_{ref} \times \frac{i_C}{i_C\big|_{nef}} \times \frac{v_{CE}}{v_{CE}\big|_{ref}} \times f_{SW} \tag{4}$$

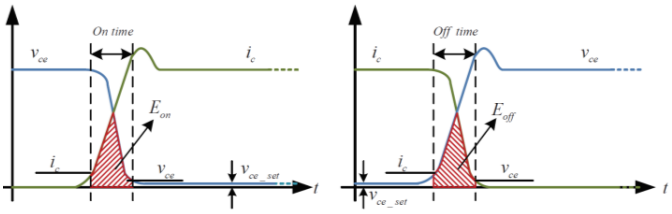


Fig. 7. Periodos de pérdidas de conmutación: Turn-on y Turn-off.

Asimismo las pérdidas de conmutación asociada al diodo (P_{SWD}) son debidas al efecto de recuperación inversa. Estas pérdidas están relacionadas con la frecuencia de conmutación (f_{SW}), la tensión del bus ($+V_{DC}$) y la corriente (i_C). La ecuación (5) muestra como calcular las pérdidas de conmutación, donde $E_{rr}|_{ref}$, $i_C|_{ref}$ e $v_R|_{ref}$ son parámetros de referencia descritos en las hojas de características del dispositivo, ver fig. 8.

$$P_{SWD}\big|_{Off} = E_{rr} \times f_{SW} = E_{rr}\big|_{ref} \times \frac{i_C}{i_C\big|_{ref}} \times \frac{v_R}{v_R\big|_{ref}} \times f_{SW} \tag{5}$$

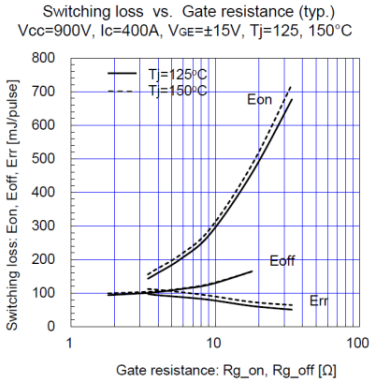


Fig. 8. Pérdidas de conmutación en los dispositivos. Parámetros de referencia $E_{ON}|_{ref}$, $E_{OFF}|_{ref}$ y $E_{rr}|_{ref}$ obtenidos del diagrama proporcionado por el fabricante.

Por otro lado los tiempos de conmutación t_{on} (turn-on time) y t_{off} (turn-off time) pueden ser obtenidos mediante el diagrama del fabricante, ver ecuaciones (6) y (7).

$$t_{on} = t_{d(on)} + t_r \tag{6}$$

$$t_{off} = t_{d(off)} + t_f \tag{7}$$

donde $t_{d(on)}$, $t_{d(off)}$ son los tiempos de retraso, mientras que t_r, t_f constituyen los tiempo de subida y bajada respectivamente.

D. *Estrategias de Modulación*

Existen varios métodos para controlar el comportamiento de la tensión fundamental generada por un inversor trifásico sobre la carga. Algunos de los métodos implementados en la actualidad son: sinusoidal PWM (SPWM), space-vector modulation (SVM), third harmonic injection (THIPWM) o discontinuous tecniques (DPWM), [18]. En este documento se han aplicado estas técnicas de modulación clásicas sobre el inversor 3L-NPC con objeto de analizar las pérdidas de conducción y conmutación en los dispositivos.

Una de las técnicas más importantes es la modulación PWM discontinua (DPWM). Existen varios tipos de algoritmos que poseen en común la inyección de una señal de secuencia cero (ZSS). En los inversores trifásicos estas señales se pueden agregar adicionalmente sobre la modulación con el propósito de mejorar el rendimiento. De este modo es posible aumentar el rango lineal del índice de modulación (MI) en el convertidor. A su vez los armónicos incorporados se cancelan en las tensiones de línea. Su principal objetivo es la reducción de las pérdidas de conmutación en los dispositivos [19].

Hoy en día la investigación sobre métodos de modulación se centra en la búsqueda de secuencias óptimas de conmutación sobre los dispositivos, operación a bajo índice de

modulación, adaptación a nuevas topologías y reducción del voltaje en modo común [20], [21].

E. Topología y Dispositivos

La topología del inversor 3L-NPC trifásico utilizada para estimar las pérdidas asociadas en cada tipo de modulación implementada puede observarse en la fig. 9. En el estudio presentado fueron seleccionados diferentes dispositivos con objeto de comprobar la influencia del tipo de tecnología de fabricación de los semiconductores con respecto a las pérdidas de potencia en dicha estructura. Los dispositivos IGBTs del fabricante Fuji Electric seleccionados son: 2MBI400VE-170-53 (Series SiC Hybrid); 2MBI400U4H-170 (Series U); 2MBI400VE-170-50 (Series V). Todos ellos soportan una tensión y corriente máxima equivalente a $v_{CE}|_{max} = 1{,}7kV$; $i_C|_{max} = 400A$, (ver datasheet de los componentes). De acuerdo con la información proporcionada por el fabricante, el IGBT (serie V) es un modelo fabricado en silicio de 6th generación con estructura Field-Stop (FS) y diseño "Advanced Trench". De este modo garantiza unas pérdidas inferiores al modelo IGBT (serie U).

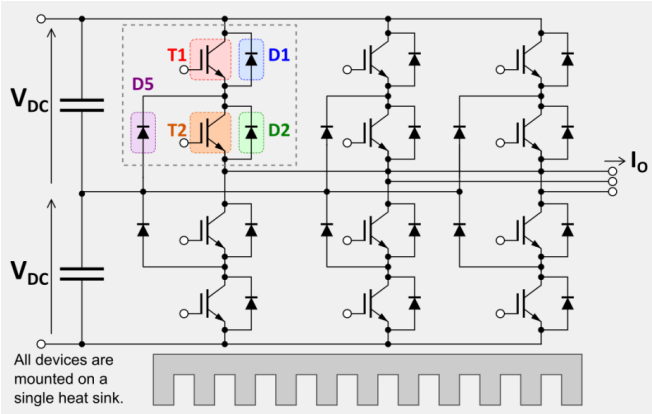


Fig. 9. Ejemplo de topología del convertidor trifásico NPC de 3 niveles proporcionado por el software IGBT Simulator.

La herramienta IGBT Loss Simulation Software permite analizar las pérdidas de potencia de los dispositivos en función de los parámetros introducidos. De esta manera es posible obtener también una comparación entre las diferentes técnicas de modulación o incluso en función de la propia tecnología de fabricación de los componentes que conforman la estructura.

Los datos incorporados en la aplicación son los siguientes: DC-link Voltage $+V_{DC} = +600V$; $i_O|_{RMS} = 150A$; factor de potencia cos φ = 0,85; Modulation ratio MI = 1; frecuencia de conmutación $f_{SW} = 5kHz$; $f_O = 50Hz$; $R_G = 3{,}4\Omega$. Temperatura ambiente y de la unión $T_A = +25ºC$; $T_j|_{max} = +150ºC$. Mientras que las resistencias térmicas fueron: $R_{th(j\text{-}c)}|_{(IGBT)} = 0{,}033ºC/W$; $R_{th(j\text{-}c)}|_{(D)} = 0{,}070ºC/W$; $R_{th(c\text{-}s)} = 0{,}0125ºC/W$. Estos datos han sido extraídos del datasheet del fabricante.

F. Estimación de las pérdidas de los dispositivos

El software utilizado permite determinar las pérdidas de potencia en los dispositivos semiconductores en función de diferentes variables de estudio. De esta forma es posible analizar de forma gráfica y visual los parámetros de mayor influencia sobre las pérdidas de potencia. También permite conocer de antemano los dispositivos que están sometidos a mayor exigencia eléctrica. Las figs. 10 y 11 representan la evolución de las pérdidas de potencia (IGBTs y diodos) en función de la frecuencia de conmutación (f_{SW}) y el índice de modulación (MI). El dispositivo utilizado se corresponde con 2MBI400VE-170-53 (Series SiC Hybrid), mientras que el método de modulación empleado es SVM.

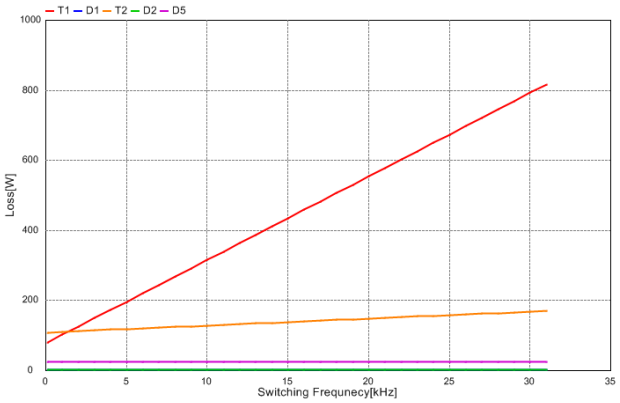


Fig. 10. Variación de las pérdidas de potencia [W] en los dispositivos (T1, D1, T2, D2, D5) versus la frecuencia de conmutación f_{SW} [kHz].

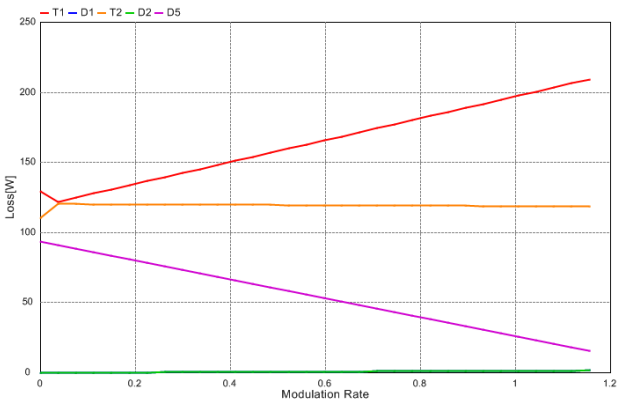


Fig. 11. Variación de las pérdidas de potencia [W] en los dispositivos (T1, D1, T2, D2, D5) versus el índice de modulación MI.

Como es obvio las pérdidas de conmutación en los IGBTs aumentan conforme incrementa la frecuencia de conmutación, ver fig. 10. Siendo el IGBT T1 el dispositivo más afectado por el aumento de este parámetro y por lo tanto está sometido a mayor solicitación térmica. También es posible representar la evolución de las pérdidas en los componentes en función del índice de modulación MI, ver fig. 11.

G. Cálculo de la Temperatura en los dispositivos

El software de simulación utiliza el modelo térmico representado en la fig. 12 para estimar de la resistencia térmica. La temperatura en el disipador (T_f) está calculada suponiendo que la superficie del radiador tiene un contacto uniforme con el módulo de potencia. De esta forma es posible

calcular las pérdidas y la temperatura en los dispositivos en función de las variables de estudio, ver las figs. 13 y 14. La aplicación requiere los datos correspondientes a la resistencia térmica del radiador $R_{th(c-s)}$ y la temperatura ambiente T_A = +25ºC. Indicando además si se corresponde con un sistema de ventilación natural o forzada. De este modo utiliza los datos de las pérdidas de potencia en los diferentes dispositivos semiconductores para obtener la evolución de su temperatura, ver fig. 13.

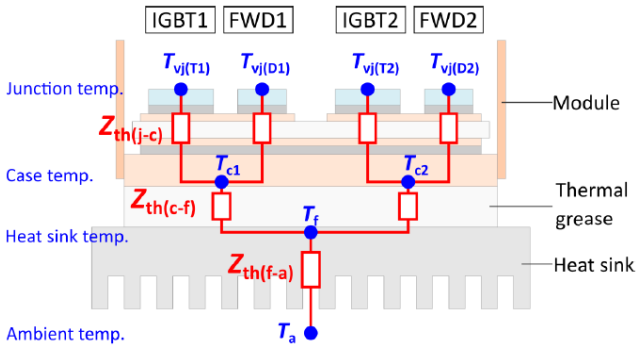


Fig. 12. Diagrama esquemático con las diferentes resistencias térmicas existentes entre la temperatura de la unión Tj y la temperatura ambiente Ta.

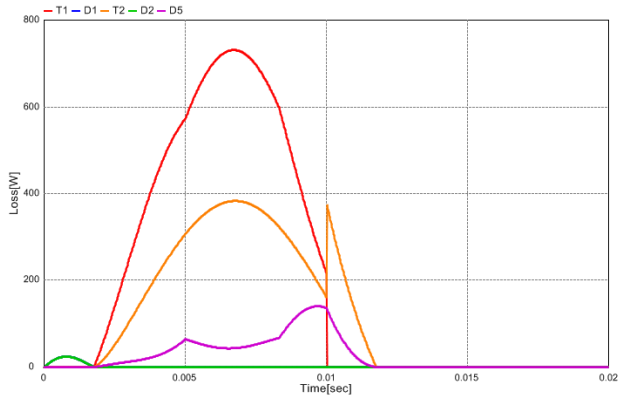


Fig. 13. Variación de las pérdidas de potencia [W] en los dispositivos (T1, D1, T2, D2, D5) versus tiempo t [s]; técnica de modulación SVM.

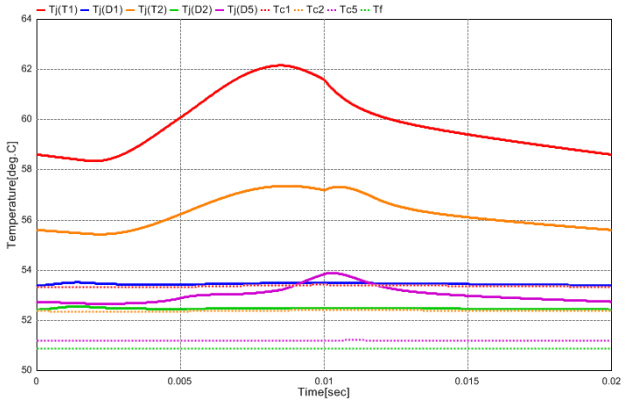


Fig. 14. Variación de la temperatura [ºC] en los dispositivos (T1, D1, T2, D2, D5) versus tiempo t [s]; técnica de modulación SVM.

Las pérdidas de potencia en los dispositivos de una rama, correspondientes a un ciclo de la señal de salida (f_O = 50Hz → T = 20ms), son mostradas en la fig. 13. Las temperaturas de la unión en los diferentes dispositivos T_j, en los encapsulados T_c y radiador T_f también pueden ser observadas en la fig. 14. Como era de esperar el IGBT T1 es el dispositivo crítico de la estructura. Shi-Zhou et al. [22] presentan un estudio sobre un sistema de refrigeración en un inversor 3L-NPC de alta potencia. En este trabajo académico se muestra en detalle el análisis y modelado del sistema. El módulo de potencia es simulado mediante el método de elementos finitos. Los resultados presentados, de forma escalada, son comparables a los obtenidos con esta herramienta, ver fig. 14.

III. Comparación de Tecnologías de Fabricación

En este apartado se ha desarrollado una comparación entre los diferentes dispositivos seleccionados. Se ha considerado la técnica SPWM como método de modulación de referencia. Como es obvio los dispositivos fabricados en tecnología de SiC poseen mejores prestaciones y menores pérdidas que los fabricados en Si, considerando unos parámetros equivalentes. Dentro de la tecnología de fabricación en Si, la construcción de la puerta vertical (trench gate) resulta más eficaz, ver tabla I. Por otra parte, la tabla II muestra las temperaturas máximas $T_{(peak)}$ y temperaturas medias $T_{(ave)}$ alcanzadas en los diferentes dispositivos en función de su tecnología de fabricación.

Tabla I. Comparación de las Pérdidas de Potencia [W] en los semiconductores en función de la tecnología de fabricación.

Semiconductor Device	Series SiC 2MBI400VE	Series U 2MBI400U4H	Series V 2MBI400VE
T1 Total	196,6W	206,8W	202,8W
T1 Conduction	77,4W	87,4W	72,1W
T1 Turn-on	34,2W	50,4W	71,8W
T1 Turn-off	85W	69W	58,9W
D1 Total	0,9W	9,7W	6,5W
D1 Conduction	0,9W	1W	1W
D1 Recovery		8,7W	5,5W
T2 Total	119,4W	134,9W	113,2W
T2 Conduction	109,5W	124,1W	101,7W
T2 Turn-on	2,7W	4,6W	6,3W
T2 Turn-off	7,3W	6,2W	5,3W
D2 Total	0,9W	1W	1W
D2 Conduction	0,9W	1W	1W
D2 Recovery			
D5 Total	27,1W	117,6W	86,6W
D5 Conduction	27,1W	28,6W	28,7W
D5 Recovery		89W	57,9W
Total losses branch	344,9W	470W	410,1W
Total losses system	2069,7W	2819,8W	2460,6W

Tabla II. Comparación de la Temperatura de la unión [ºC] en los semiconductores en función de la tecnología de fabricación.

Semiconductor Device	Series SiC 2MBI400VE	Series U 2MBI400U4H	Series V 2MBI400VE
T1 Tj(peak)	62ºC	79,2ºC	67,3ºC
T1 Tj(ave)	59,8ºC	75,6ºC	65,1ºC
D1 Tj(ave)	53,4ºC	64ºC	58,8ºC
T2 Tj(peak)	57,4ºC	72,1ºC	62ºC
T2 Tj(ave)	56,3ºC	70,2ºC	60,9ºC
D2 Tj(ave)	52,4ºC	62,1ºC	57,3ºC
D5 Tj(ave)	53,1ºC	74,7ºC	62,3ºC

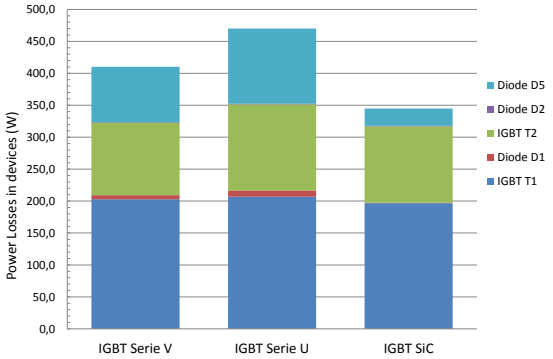


Fig. 15. Distribución de las pérdidas de potencia [W] en los diferentes dispositivos (T1, D1, T2, D2, D5) de la topología 3L-NPC.

La distribución de las pérdidas en los diferentes dispositivos de la estructura 3L-NPC para las tecnologías de fabricación analizadas, es mostrada en la fig. 15. Este diagrama recoge las pérdidas totales agrupadas por dispositivo en el caso analizado en la tabla I.

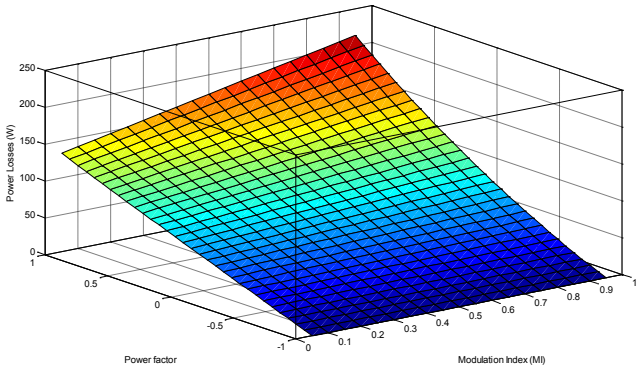


Fig. 16. Distribución de las pérdidas de potencia [W] en el IGBT T1 versus índice de modulación (MI) y factor de potencia cos φ. Modulación SPWM.

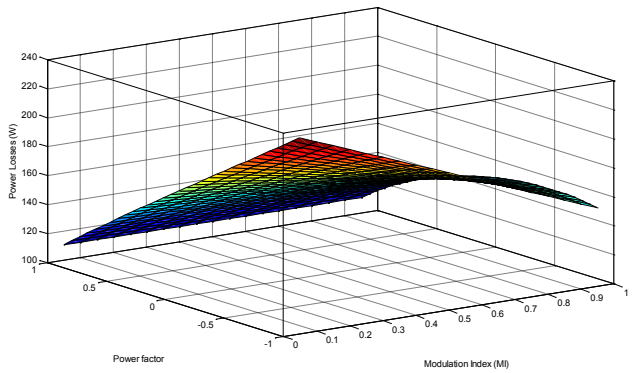


Fig. 17. Distribución de las pérdidas de potencia [W] en el IGBT T2 versus índice de modulación (MI) y factor de potencia cos φ. Modulación SPWM.

Del mismo modo es importante conocer las condiciones críticas de funcionamiento de los dispositivos que constituyen la etapa de potencia. Los diagramas mostrados en las figs. 16, 17 y 18 indican la distribución de las pérdidas de potencia, en función del índice de modulación (MI) y del factor de potencia (cos φ) en la corriente de salida, en los dispositivos T1, T2 y D5. Como se aprecia en los diagramas, el dispositivo IGBT T1 es el elemento crítico de la estructura. Por otra parte la fig. 19 representa la distribución de las pérdidas de potencia en el IGBT T1 en función de la frecuencia de conmutación (f_{SW}) y del índice de modulación (MI).

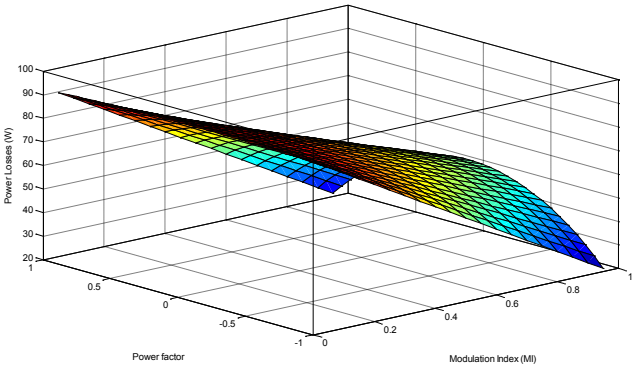


Fig. 18. Distribución de las pérdidas de potencia [W] en el diodo D5 versus índice de modulación (MI) y factor de potencia cos φ. Modulación SPWM.

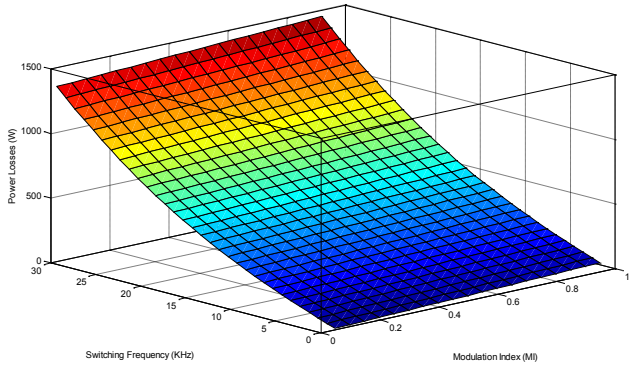


Fig. 19. Distribución de las pérdidas de potencia [W] en el IGBT T1 versus índice de modulación (MI) y Frecuencia de conmutación (f_{SW}). Estrategia de Modulación SPWM.

IV. Comparación de las Técnicas de Modulación

En este apartado se desarrolla una comparación entre las diferentes técnicas de modulación clásicas (SPWM, SVM, THIPWM y DPWM). El objetivo es determinar cuál de ellas resulta más ventajosa en términos de disminuir las pérdidas de potencia. El dispositivo seleccionado es el IGBT modelo 2MBI400VE-170-50 (Series V).

Como se aprecia en la tabla III, el método de modulación discontinuo DPWM1 proporciona unas menores pérdidas de potencia en el IGBT T1. Esto es debido a que el número de veces que este dispositivo conmuta por periodo, es mucho menor que con otros métodos de modulación PWM. El criterio de optimización de esta técnica de modulación son las pérdidas de conmutación asociadas a los dispositivos. A diferencia de los algoritmos continuos, las técnicas DPWM generan conmutaciones sólo en 2/3 del ciclo de la señal moduladora. Mientras que las pérdidas de potencia relacionadas con las técnicas de modulación clásicas (SPWM, SVM, THIPWM) resultan de una magnitud similar.

La fig. 20 muestra la evolución de las pérdidas de potencia en los distintos dispositivos semiconductores de una rama del

convertidor 3L-NPC, aplicando la técnica de modulación discontinua DPWM1 y considerando un ciclo de la señal de salida (f_O = 50Hz → T = 20ms).

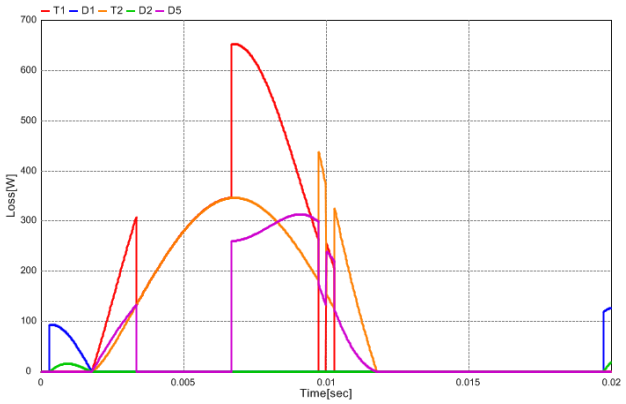


Fig. 20. Variación de las pérdidas de potencia [W] en los dispositivos (T1, D1, T2, D2, D5) versus tiempo t [s], modulación DPWM1.

TABLA III. COMPARACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA [W] EN LOS SEMICONDUCTORES EN FUNCIÓN DEL MÉTODO DE MODULACIÓN.

Modulation strategy	SPWM	SVM	THIPWM	DPWM1
T1 Total	202,7W	203,3W	198,9W	137,2W
T1 Conduction	72,1W	72,7W	72,5W	70,9W
T1 Turn-on	71,8W	71,8W	71,7W	37,5W
T1 Turn-off	58,9W	58,7W	54,7W	28,7W
D1 Total	6,5W	7W	6,9W	6,2W
D1 Conduction	1W	1,5W	1,5W	0,9W
D1 Recovery	5,5	5,5W	5,5W	5,3W
T2 Total	113,6W	113,1W	112,3W	112,2W
T2 Conduction	101,7W	101,2W	101,2W	100,9W
T2 Turn-on	6,4W	6,4W	6,3W	6,4W
Tr Turn-off	5,4W	5,4W	4,9W	5W
D2 Total	1W	1,5W	1,5W	0,9W
D2 Conduction	1W	1,5W	1,5W	0,9W
D2 Recovery				
D5 Total	92,4W	91,3W	85,4W	58,7W
D5 Conduction	28,7W	27,7W	27,8W	28,9W
D5 Recovery	63,7W	63,6W	57,8W	29,8W
Total losses branch	416,2W	415,9W	405,2W	315,2W
Total losses system	2497,3W	2497,5W	2431,0W	1891,2W

Los resultados proporcionados por el software IGBT Losses Simulation fueron comparados con los obtenidos al simular el modelo 3L-NPC en Matlab/Simulink. De esta forma es posible determinar su dispersión. Las pérdidas estimadas en los diferentes dispositivos de la etapa, así como las conclusiones obtenidas al efectuar las comparaciones son similares a las indicadas en la literatura consultada. También se puede apreciar la misma tendencia en los resultados obtenidos; lo que permite validar el procedimiento llevado a cabo en este documento.

Integrar el uso de ambos software de forma complementaria ha permitido no sólo analizar las pérdidas en los componentes sino también proporcionar un nuevo punto de vista sobre las topologías y las pérdidas en los dispositivos. Todo ello conlleva a un mejor entendimiento en el funcionamiento del sistema.

V. CONCLUSIONES

En este documento se han presentado varios estudios relacionados con las pérdidas de potencia aproximadas en los semiconductores que integran una topología 3L-NPC en un convertidor trifásico. El software gratuito utilizado es el IGBT Losses Simulator de Fuji Electric. La evolución de las pérdidas de potencia en los dispositivos semiconductores en función de diferentes parámetros de estudio, también ha sido mostrada. De este modo se han establecido comparaciones de las pérdidas en función de la propia tecnología de fabricación y de las técnicas de modulación aplicadas (SPWM, SVM, THIPWM y DPWM). El objetivo ha sido apreciar las diferencias entre las técnicas de modulación empleadas. Del mismo modo es posible determinar el elemento que está sometido a mayores requerimientos técnicos en cada momento y garantizar así la fiabilidad de la estructura.

También ha sido posible obtener y comparar la temperatura instantánea en los diferentes elementos y partes de la etapa de potencia: temperatura de la unión T_j, capsula T_c o radiador T_f en función de la resistencia térmica R_{th} de los componentes utilizados. Todo ello ayuda en el dimensionamiento adecuado del sistema de refrigeración del convertidor; detectando los elementos más restrictivos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Universidad de Zaragoza para el desarrollo del presente trabajo, a través del Programa de Innovación e Investigación Educativa (PIIDUZ 2017/18). Referencia de Proyecto: PIIDUZ_17_059.

REFERENCIAS

[1] F.H. Gandoman, A. Ahmadi, A.M. Sharaf, P. Siano, J. Pou, B. Hredzak and V.G. Agelidis. Review of FACTS technologies and applications for power quality in smart grids with renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier ScienceDirect.* Vol. 82, Part 1, February 2018; pp.: 502 to 514.

[2] Z. Zeng, H. Yang, R. Zhao and C. Cheng. Topologies and control strategies of multi-functional grid-connected inverters for power quality enhancement: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier ScienceDirect*. Volume 24, August 2013; pp.: 223 to 270.

[3] A. Antonio-Ferreira, C. Collados-Rodríguez and O. Gomis-Bellmunt. Modulation techniques applied to medium voltage modular multilevel converters for renewable energy integration: A review. *Electric Power Systems Research. Elsevier ScienceDirect*. Volume 155, February 2018, pp.: 21 to 39.

[4] J. Rodriguez, S. Bernet, P.K. Steimer and I.E. Lizama, "A Survey on Neutral-Point-Clamped Inverters". *IEEE Transactions on Industrial Electronics. IEEExplore Digital Library.* Volume: 57, Issue: 7, 2010; pp.: 2219 to 2230.

[5] L. Clotea, A. Forcos, C. Marinescu and M. Georgescu. "Power losses analysis of two-level and three-level neutral clamped inverters for a wind pump storage system". *12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM'10. IEEExplore Digital Library.* May 2010, pp.: 1174 to 1179.

[6] K. Lee, H. Shin and J. Choi, "Comparative analysis of power losses for 3-Level NPC and T-type inverter modules". *IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*. October 2015; pp. 1 to 6.

[7] A. Babaie, B. Karami and A. Abrishamifar. "Improved equations of switching loss and conduction loss in SPWM multilevel inverters". *7th*

Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference (PEDSTC 2016). IEEExplore Digital Library. February 2016, pp.: 559 to 564.

[8] H. Seung-Wook, L. Hee-Jun, L. Taeck-Kie and W. Chung-Yuen. "High efficiency SVPWM method to reduce switching loss of 3-level NPC PWM inverter". *IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC 2014 Asia-Pacific)*. November 2014 pp.: 1 to 4

[9] F. Filsecker, T. Barth, R. Weiss and S. Bernet. "Loss reduction in a 3L-NPC inverter with SiC neutral point diodes through model predictive control". *18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*. 2016, pp.: 1 to 8.

[10] D.A.B. Zambra, C. Rech, F.A.S. Goncalves and J. R. Pinheiro. "Power losses analysis and cooling system design of three topologies of multilevel inverters". *IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC'08). IEEExplore Digital Library.* June 2008, pp.: 4290 to 4295.

[11] L. Soon-Jong, H. Seung-Wook, H. Seok-Jin, L. Hee-Jun and W. Chung-Yuen. "Predictive thermal modeling for loss distribution method of 3-level active NPC inverter". *IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC 2015)*. Pages: 1 to 5.

[12] H. Shin, K. Lee, J. Choi, S. Seo and J. Lee. "Power loss comparison with different PWM methods for 3L-NPC inverter and 3L-T type inverter". *International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC 2014)*. November, pp.: 1322 to 1327.

[13] A. Mirizadeh, F.A. Baroogh, M. Gheydi, H. Zarrabi and P. Farhadi, "Evaluation of conduction and switching losses in cascaded multilevel inverters" *International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE'17)*, *IEEExplore Digital Library.* March 2017. Bucharest, Romania, pp.: 124 to 127.

[14] M. Farhadi, M. Abapour and M. Sabahi. "Failure analysis and reliability evaluation of modulation techniques for neutral point clamped inverters—An usage model approach". *Engineering Failure Analysis*. *Elsevier Science Direct.* Volume 71, January 2017, pp.: 90 to 104.

[15] R. Teichmann and S. Bernet, "A comparison of three level converters versus two level converters for low voltage drives, traction and utility applications". *IEEE Trans. on Industrial Applications*, vol. IA-41, no. 3, pp. 855-865, 2005.

[16] Semikron Application Manual Power Semiconductors (online): http://www.semikron.com/

[17] Fuji Electronics IGBT Module data-sheet (online): http://www.fujielectronic.com

[18] A. Pevere and R. Petrella. "Discontinuous hybrid modulation technique for three-phase three-level neutral point clamped inverters". *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE 2013). IEEExplore Digital Library.* 15-19 September 2013, pp.: 3992 to 3999.

[19] A.M. Mahfuz-Ur-Rahman, Md. Mazharul Islam and Md. Rabiul Islam. "Performance analysis of modulation techniques in multilevel inverters for direct grid connected photovoltaic arrays". *9th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE2016). IEEExplore Digital Library.* December 2016, pp.: 66 to 69.

[20] A. Radan, A.H. Shahirinia and M. Falahi. "Evaluation of Carrier-Based PWM Methods for Multi-level Inverters". *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2007. IEEExplore Digital Library.* July 2007, pp.: 389 to 394.

[21] S. Calligaro, F. Pasut, R. Petrella and A. Pevere "Modulation techniques for three-phase three-level NPC inverters: A review and a novel solution for switching losses reduction and optimal neutral-point balancing in photovoltaic applications". *Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2013). IEEExplore Digital Library.* March 2013, pp.: 2997 to 3004.

[22] Shi-Zhou Xu, Yu-Feng Peng and Shao-Yu Li. "Application thermal research of forced-air cooling system in high-power NPC three-level inverter based on power module block". *Case Studies in Thermal Engineering. Elsevier Science Direct.* Volume 8, September 2016, pp.: 387 to 397.

SESIÓN II.A: SISTEMAS DE COMUNICACIÓN / PROCESADO DE SEÑAL 2

Software Based AFSK Generation on Arduino

Luis Sánchez Velasco
GranaSAT Aerospace Group
University of Granada
Granada, Spain
hfegetude@gmail.com

Andrés Roldán Aranda
Electronics Department
University of Granada
Granada, Spain
amroldan@ugr.es

***Abstract*—Master courses need to have a practical element, applying already known concepts to concrete problems. In this paper, the design and manufacturing of a radio link using APRS protocol over AX.25 will be presented as coursework during several lab sessions. The aim is to create a system that is able to poll data from several sensors and send them wirelessly with a software implemented signal generator in a microprocessor.**

Keywords—Wireless Communication, APRS, AFSK, AX.25, SDR and Sound Modem

I. INTRODUCTION

The current availability of breakout modules and the power of microprocessors facilitate the creation of products able to read data from several sensors and transmit such data to one or several receivers. This paper tries to explore this concept by using a not so usual transmission method in the current technological scene, which is AX.25 data packages over AFSK modulation. The proposed design is a suitable candidate for laboratory work in a multi-disciplinary course where many students with different backgrounds could be working together in groups of 5-8 people with background in electrical design, signal processing or computer science, for example any Product Design course of a master in technology, for example a master in Wireless communication systems. This product could be used to test wireless satellite communication by having a reliable emitter, also this could be used as the main board in a weather balloon.

This work can be divided in three main parts, as the basic diagram in figure 1 shows. A software design group, a hardware design group and finally an Embedded Software group, each group could work independently from each other if the work is correctly shared among the participants and periodical meetings are done.

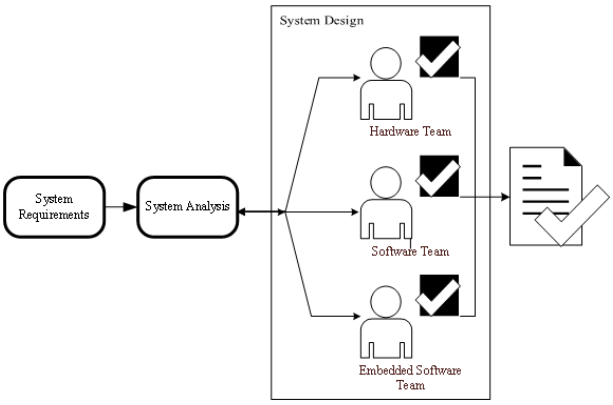


Fig. 1: Product design flow

A. State of the art.

APRS transmitter and receivers, even not so popular, are widely used for high distance transmission systems, as we can see in aprs.fi, a web page that collects data from APRS emitters and put them online, many devices use this system. These emitters are usually built around a PC and a Terminal Node Controller (TNC), a device that, if attached to a radio amplifier and modulator, will transmit the required signal. These devices are usually expensive and not as portable, issues that the design presented here will try to overcome.

II. METHODS

In order to design a successful device the standard product design flow will be executed in the following order: Design Specifications, System Analysis, System Design and testing.

A. Requirements of the Design

The design requirements of a product define the absolute minimum functionality of a device to be considered finished and functional; therefore, these requirements are meant to be met when the work is finalized. These requirements are as follows:

1. The system shall be able to transmit data over AX.25 with AFSK modulation
2. The system shall be able to read from several external sensors, these sensors are: a magnetometer, an accelerometer, a gyroscope, a barometer, a GPS and a thermometer.
3. The data generated by the sensors shall be logged onto a SD card and transmitted over AX.25
4. Images shall be taken with a camera module and placed onto the SD card.
5. A GUI capable of reading data from the USB Serial Port or an SDR and display such data.

These requirements shall be discussed by the students in each group in order to reach a final action plan and how each requirement shall be fulfilled. After such discussion a technical paper could be given to the tutor synthetizing these requirements, simulating a possible client.

B. Proposed Solution, System Anaylisis

During this production step, the group of students shall agree during several meetings on how to split the group in the different subsections and also, agree on the various details

that the solution may have. In this paper a possible solution will be presented.

The proposed block diagram for the system is depicted on Fig. 2. This solution consists of an Arduino Mega as the main MCU [1] due to its easy implementation and number of peripherals. All of the sensors will be read from an I2C port or a serial port. Due to the current availability at the laboratory, an OV7670 camera module will be used. This module contains a FIFO making it easier to be interfaced with. Finally, the output AFSK will be generated and outputted with PWM signal and then low-pass filtered, this solution will not require any extra digital modules since the analog signal will be software generated, therefore only an external modulator to set the frequency at 144.8 MHz will be required.

A GUI programmed with Python is desirable to be created due to its simplicity and ease of access to external modules such as the Serial Port and the audio input from an SDR.

C. System Design

This part contains the actual in depth solution to the product and its implementation. These tasks shall be distributed among groups of students depending on the background of each of them.

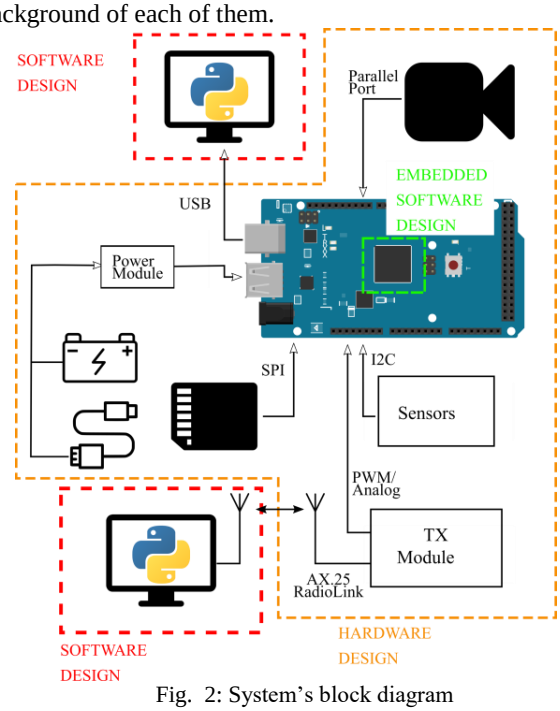


Fig. 2: System's block diagram

1) Hardware design

The hardware design team shall be in charge of selecting the right hardware components and sensors as well as creating a PCB to hold all the components together and correctly interfaced. A 3D model is also desirable to improve the presentation of the product; an example of a 3D modeled board is show below in figure 3.

Small prototypes interconnecting one of more hardware parts are desirable since it will allow the rest of the team in charge of the embedded software and software a faster development as the one depicted in figure 4.

The final selected sensors are.

- BMP180, which integrates both a temperature sensor and a barometer, this module is interfaced through I2Cpresenting a range of -40 to 65ºC for the thermometer and 200-1100 hPa in the barometer. [2]
- LSM303 integrating both an accelerometer and a magnetometer. This system is also interfaced through I2C and the documentation found online is wide. [3]

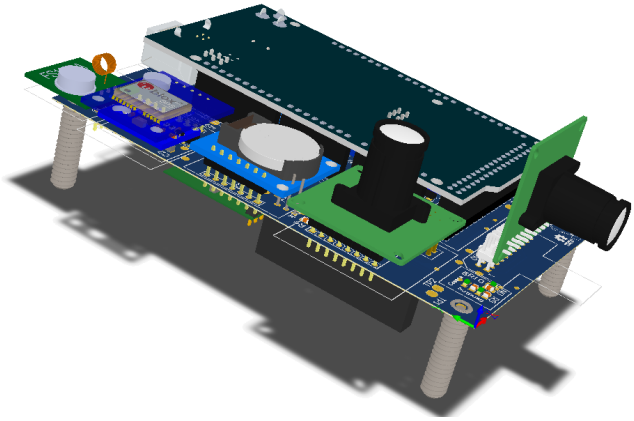


Fig. 2: 3D model of the final PCB

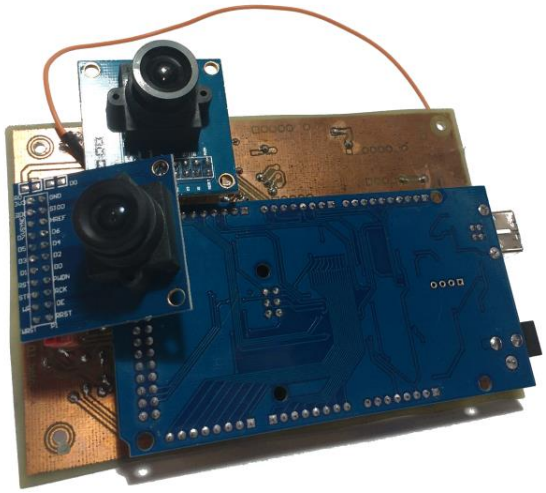


Fig. 3: Final PCB

- The Gyroscope system is integrated by an MPU6050 that also contains and accelerometer, suitable for contrasting the date from the LSM303. The full scale of this device is adjustable from 250 to 2000 º/s. [4]
- As a GPS unit, the NEO-6 from u-blox is selected due to its ease of use through the serial port and automatic configuration and calibration is chosen.
- An OV7670 plus a FIFO chip is selected to take the images into the MCU. The OV7670 requires an input signal of 8MHz and will output data at the same rate. Reading from such device, though possible, will make the work way harder with no clear advantage.
- The Arduino will produce and AFSK signal that is not suitable to be transmitted due to its low frequency therefore a radio module such as the HX-11 shall be used to elevate the central frequency to 144.8 MHz, placing it in the Free / Amateur radio band.

After the items, where selected and studied a board as the one depicted in figure number 4. The board was manufactured by an external company for a small amount of money. This board includes:

1. An external battery connector with a DC-DC converter

2. Level shifters in order to interface 3.3 V logic with 5 V logic.
3. An external connector for an antenna.
4. Test points in order to facilitate debugging.

2) Embedded Software Design

One of the main advantages of using the Arduino platform is the wide availability of software libraries to poll data from common hardware modules with ease. All these software libraries will be used to communicate with the I2C devices as well as parse the data coming from the UART port. All of these devices will be polled periodically in order to obtain regular data from the environment. This data will then be transmitted wirelessly by the implemented AFSK transmitter. The analog signal that will drive the modulator will be entirely generated in software at baseband frequency and then elevated by the external radio modules to 144.8 MHz.

a) AX.25 frame generation[5]

The first step will be to generate a suitable AX.25 frame for transmission; this header will contain all the collected parameters with their correspondent identifier separated by a backslash. After that, the header will be generated corresponding to [5].

b) AFSK Generation

The actual implemented modulation is AFSK1200 NRZ that means that the produced tone will oscillate between 1200 and 2200 Hz sending data at 1200 bauds. In order to generate such tones, the 8-bit Timer/ Counter implemented inside the Arduino's ATmega 2560, and then the sampling rate, the samples per baud and the total lookup table size can be obtained using equations 1, 2 and 3:

$$Sampling\ Rate\ = 16\ \text{MHz}\frac{1}{256} = 62500\frac{\text{samples}}{s} \quad (1)$$

$$Samples\ Per\ Baud = \frac{SamplingRate}{Bauds} = 52 \quad (2)$$

$$\Delta\delta = \text{TABLE SIZE}\frac{f_m}{\text{Sampling Rate}} \quad (3)$$

Then the phase accumulator algorithm shall be followed AS described in [6]. The program will first load a bit into memory from the AX.25 frame buffer, if that bit results to be 0 then the phase delta will be toggled to the other tone. This is because a NRZ modulation is used, thus the transmitting symbol is only switched once a 0 is found and kept otherwise. Once the phase delta is obtained, the instantaneous phase can be obtained in equation 4 for each iteration:

$$\delta \leftarrow \delta + \Delta\delta \quad (4)$$

The actual sample value is obtained by a lookup table, which values where calculated using the following formula.described in equation 5.

$$TABLE[i] = 255 \sin\left(2\,\pi\frac{i}{TABLE\ SIZE}\right) \quad (5)$$

Then the phase accumulator will continue to increment the phase by the phase delta previously selected until the number of samples per baud are meet. In such case, a new sample shall be collected to restart the cycle again. This is graphically explained in figure number 5.

Regarding the actual software implementation both the outputting task and frame generation activity where done in parallel to save time and memory. All the generated samples were placed in a software ring buffer and read by an interrupt that will trigger every time a new sample has to be output.

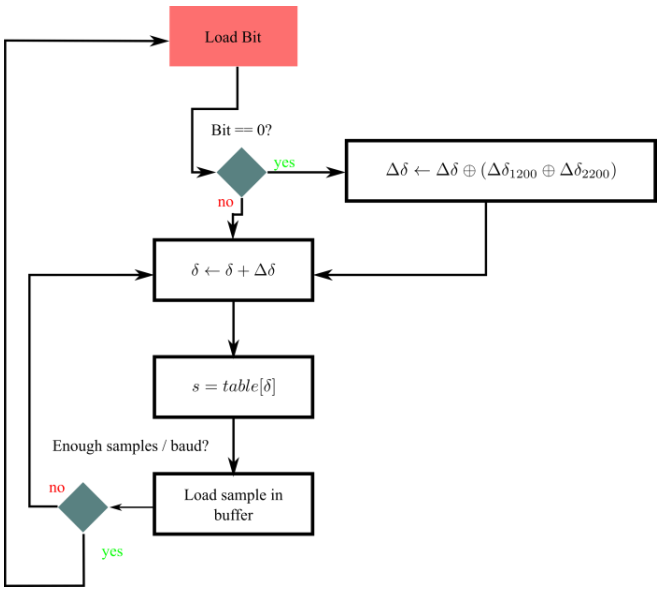


Fig. 5: AFSK Generation algorithm

This interrupt function will collect the sample and place on the comparation register of the ATmega 2560 (OCR) that will set the output pin low on a successful match. Once the counter reaches 255 and resets, the output pin is set again to high. A picture displaying this idea is shown in figure 6.

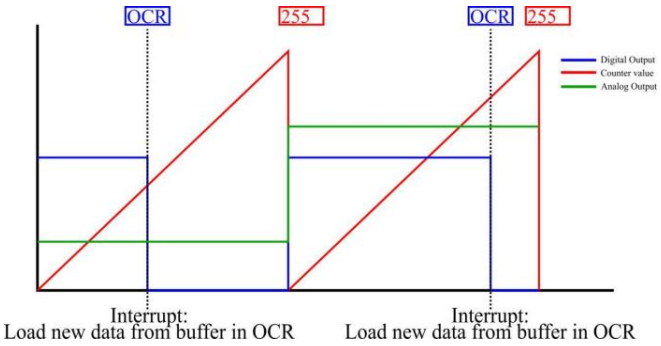


Fig. 6: PWM Signal of the Arduino

c) Interfacing with OV7670 FIFO module [7].

The connection between the MCU and the camera's FIFO is achieved with a parallel port connection. The VSYNC pin from the camera module itself is exposed, displaying a high pulse every time a new frame capture is about to begin.

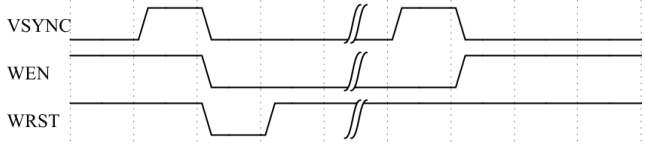


Fig. 7: Capturing a frame into FIFO

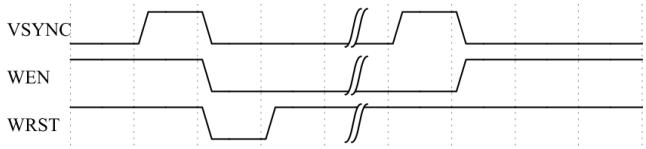


Fig. 8: Reading from the FIFO

Once this pulse occurs the Arduino must reset the write pointer of the FIFO and enable writing on it. This is achieved by setting the WEN pin low during all the transaction and

pulsing the WRST pin. The timing diagram previously described is displayed on figure 8.

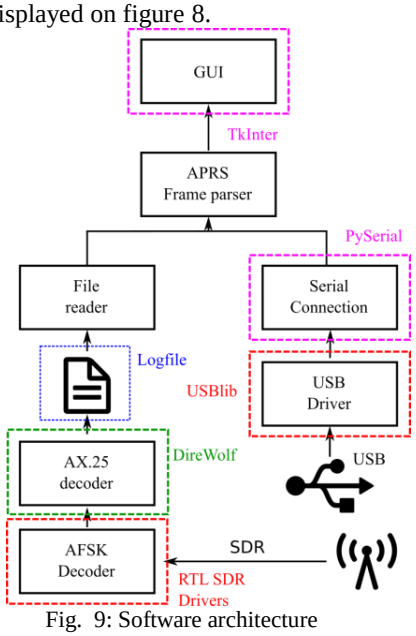


Fig. 9: Software architecture

To retrieve the image on to the SD card / MCU's main memory, the read pointer of the FIFO must be set to the beginning of the memory. Meanwhile pulses shall be generated into the input read clock, obtaining an image byte per pulse, as displayed in figure 6.

3) Software Design

In order to create a successful that is able to read both from the USB port, logging debug data for development and radio data from an SDR can be achieved easily thanks to the many open source projects that are available online. For this task the selected libraries/ frameworks / programs are:

- Rtl-sdr, open source drivers for the common SDR dongles that allow to stream the received signal as an audio signal.
- Direwolf, complete radio suite allowing to transmit as a TNC and receive data from an SDR, in this project it will be used as an AX.25 decoder
- PySerial, Python package that allows the interaction with a serial port programmatically.
- TkInter, framework used for creating graphical applications in python.

In figure 9, the software architecture of the project is depicted. Having that open source projects already chosen the task transform into a high level programming project where the only parts that need to be implemented by the students are the APRS frame parser, that will take the raw APRS string and transform it into numeric variables that will be displayed by the GUI made with TkInter.

In order to obtain the data from the radio module, an instance of Direwolf will be run which will load all the received APRS data onto a file, that same file will be read by the created python script and then fed into the APRS frame parser.

III. RESULTS

The final PCB was produced a manufactured by an external collaborator, the result is shown in figure 10.



Fig. 10: Final PCB produced

1) AFSK generation

The signal was successfully generated using the software designed, figures 11 and 12 show the output signal captured by a scope after being filtered Low Pass 10Khz to avoid displaying the PWM signal itself. The measured deviation was no more than 200Hz from the aimed frequency, which makes it feasible to be demodulated by a cheap radio module such as an USB SDR for a latter data analysis using dedicated software.

Below an example captured frame is shown:

[1887791]GSA-11>APRS,WIDE2-1:/16-03-95/00:31:43/0000.00N/00000.00EO/RoX=0.00/RoY=-0.89/RoZ=-0.71/AcX=1.57/AcY=-0.08/AcZ=-0.04/MaX=-0.09/MaY=-0.34/MaZ=0.34/T=22.63/P=940.44

This frame was captured using an USB SDR through SDR# with the AFSK demodulator QTMM, which is displayed in figure 13. The measured range of the measured transmission was of about 10 meters using λ/2 antenna. This distance could be significantly improved using a properly designed antenna and a RF amplifier.

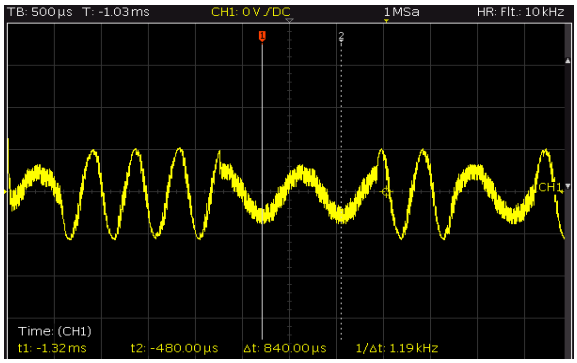


Fig. 11: 1.2 kHz generated signal

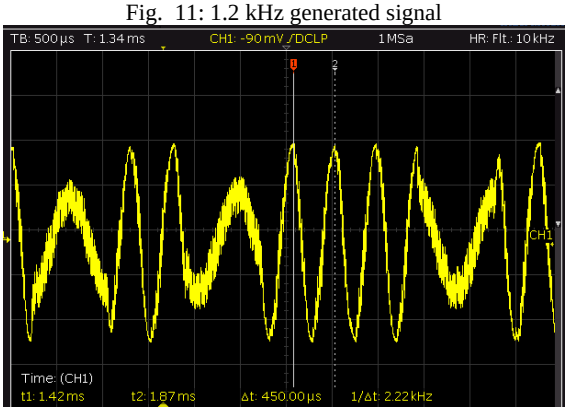


Fig. 12: 2.2 kHz generated signal

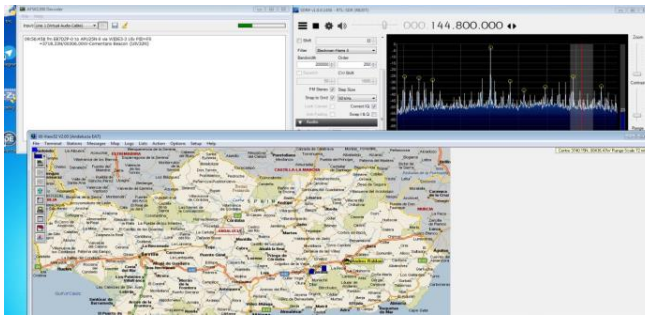


Fig. 13: Signal demodulation with SDR# and QTMM

2) Image capture

The captured image is shown in figure 14, this image shows a test pattern generated by the camera with the purpose of having a known image to test capture and color reception of the frame.

IV. DISCUSSION

During this possible Product Design course project the student could potentially acquire knowledge of how a modern device is designed and fabricated making it a perfect lab work to understand this field. The student will be put in a situation where a product must be designed with other student from different backgrounds, having to auto evaluate their own knowledge in order to create a successful work.

Regarding the electronic design, the student will gain knowledge about RF design and routing along with concepts of digital transmission protocol such as I2C or UART. Also modern PCB design a manufacture will be learn, as well as hardware debugging.



Fig. 14: Captured camera test pattern

In software design, concepts about microcontrollers low level C programming techniques are expected to be used to be able to generate the date at the sufficient speed. In addition, concepts of basic data treatment from sensors and polling are required. If the GUI is finally implemented, the student will learn how to read from external ports in a computer and display data in an understandable way using a high-level language such a Python.

CONCLUSION

The exposed work is a very complete course project suitable for a master degree in a technical field that expects students from very different backgrounds that will challenge them to cooperate while and use their previously acquired technical knowledge to overcome the course. This laboratory/ project session is meant for teaching the students the value of team work and how it can achieve the solution of high level technological problems, therefore individual evaluation is discouraged, in order to make the students share the work properly.

REFERENCES

[1] "Atmega2560 datasheet", Atmel

[2] "BMP180 Datasheet", BOSH

[3] "LSM303 Datshhet". ST

[4] "MPU6050 Datasheet". InvenSense

[5] "AX.25 Link Access Protocol for Amateur Packet Radio", TAPRJ

[6] Ibrahim, S. H., Ali, S. H. M., & Islam, M. S. (2012). Design a 24-bits pipeline phase accumulator for direct digital frequency synthesizer. In *Proceedings - 2012 International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation, IMSNA 2012* (Vol. 2, pp. 393–397). https://doi.org/10.1109/MSNA.2012.6324603

[7] Wang, R., Mi, Z., Yu, H., & Yuan, W. (2011). The design of image processing system based on SOPC and OV7670. In *Procedia Engineering* (Vol. 24, pp. 237–241). https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2633

[8] Dilek, S. M., Ayranci, A., Seker, A., Ceylan, O., & Yagci, H. B. (2012). AX.25 protocol compatible reconfigurable 2/4 FSK modulator design for nano/micro-satellites. In *2012 20th Telecommunications Forum, TELFOR 2012 - Proceedings* (pp. 416–419). https://doi.org/10.1109/TELFOR.2012.6419235

A Technique for Computing the Convolution of Exponential Signals and its Application in Systems Theory

Francisco Mota
Dept. of Computer Engineering,
Univ. Fed. do Rio G. do Norte, Natal, RN – Brasil.
Email: mota@dca.ufrn.br

Tania Luna
Dept. of Electrical Engineering,
Univ. Fed. Rural do Semi-Arido, Caraubas, RN – Brasil.
Email: tania.luna@ufersa.edu.br

***Abstract*—We present a procedure for computing the convolution of (analog-time) exponential signals without the need of solving integrals. The procedure is algebraic and requires the resolution of a system of linear equations. The method can be applied to find the impulse response of a linear time-invariant (LTI) system modeled by an ordinary differential equation and also to compute the solution of an ordinary differential equation with constant coefficients. We believe this technique can be useful for the analysis of LTI systems in time domain, since it is conceptually simple and can be easily implemented as algorithms in software packages like Scilab and/or Matlab.**

Keywords: Exponential Signal, Convolution, Vandermonde Matrix, Linear Time-Invariant (LTI) System, Ordinary Differential Equation.

I. Introduction

Convolution between signals [1] is a fundamental operation in the context of the theory of linear time invariant (LTI) systems and its importance comes mainly from the fact that this operation is linear on the signals and has the property of commuting with translations and differentiations. These properties imply the following pivotal result in theory of systems: *The output signal of a LTI system is given by the convolution between the input signal and the system impulse response signal*. So, the impulse response completely characterizes a LTI system for the purpose of input-output analysis. For LTI systems whose model of ordinary differential equation (ODE) is known, we have the important result that *"the system impulse response can be decomposed as a convolution of exponential signals"*, which can be obtained from the model [2]. These facts implies that the computation of convolution involving exponential signals is an important question in the context of linear systems theory and we consider it deserves a more deep analysis than is generally presented in basic textbooks on theory of linear systems. As we show bellow, convolution between exponential signals have some properties that can be explored to devise algorithms for obtaing a LTI impulse response as well as for solving ODEs in a very simple way. Due to its simplicity we believe that this approach may be teached even in a first course on linear systems theory.

A. Notation and Definitions

The notation we use is quite standard and it is presented here only for the sake of self-containdness:

- $\mathbb{Z}$, $\mathbb{R}$ and $\mathbb{C}$ are, respectively, the set of integers, real and complex numbers;
- The binomial coefficient is defined for $n, p \geq 0 \in \mathbb{Z}$ as:

$$\binom{n}{p} = \begin{cases} 0, & n < p \\ \dfrac{n!}{(n-p)!p!}, & n \geq p \end{cases}$$

- An (analog-time) signal is defined as a complex valued function $f : \mathbb{R} \to \mathbb{C}$. In this paper we are mainly concerned with exponential signals, that is, $f(t) = e^{rt}$ where $r \in \mathbb{C}$. Two basic signals will be necessary in our development, namely, the unit step signal (σ) and the unit impulse (generalized) signal[1] (δ). The unit step σ is defined as

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases}$$

and the unit impulse can be defined as the derivative of σ, that is, $\delta = \dot{\sigma}$. If f is a signal, the product "σf" is given by

$$(\sigma f)(t) = \sigma(t) f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ f(t), & t > 0 \end{cases}$$

If f is continuous at $t = 0$ we can also compute the product "δf" as $\delta f = f(0)\delta$. Additionally, if the signal f is differentiable we can obtain the derivative of "σf" as shown bellow:

$$\dot{(\sigma f)} = \dot{\sigma} f + \sigma \dot{f} = \delta f + \sigma \dot{f} = f(0)\delta + \sigma \dot{f},$$

which will be useful in proof of Theorem 1.

- The convolution between two signals f and g, represented by $f * g$, is the binary operation defined as (see [1]):

$$(f * g)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) g(t - \tau) d\tau \qquad (1)$$

[1] A generalized signal is in fact a distribution, as defined in [4], [5].

Additionally, if $f(t) = g(t) = 0$ for $t < 0$, we get from (1) that:

$$(f * g)(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \int_0^t f(\tau)g(t-\tau)d\tau, & t > 0 \end{cases} \quad (2)$$

Convolution is commutative, associative and the unity of the operation is the (generalized) signal δ, that is, $f * \delta = \delta * f = f$ for any signal f.[2] Another important property of convolution is related with signal derivative:

$$(f \dot{*} g) = \dot{f} * g = f * \dot{g} \quad (3)$$

II. Convolution between exponential signals

In this section we consider signals $h : \mathbb{R} \to \mathbb{C}$ defined by:

$$h(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ e^{rt}, & t > 0 \end{cases} \quad r \in \mathbb{C}, \quad (4)$$

or, alternatively, $h(t) = \sigma(t)e^{rt}$, where σ is the unit step signal.

Theorem 1. Consider the convolution of $n \geq 2$ signals $\{h_1, h_2, \ldots, h_n\}$ with $h_j(t) = \sigma(t)e^{r_j t}$, where σ is the unit step signal and $r_j \in \mathbb{C}$. The i-th derivative of the convolution $(h_1 * h_2 * \cdots * h_n)$, represented by $(h_1 * h_2 * \cdots * h_n)^{(i)}$, evaluated at $t = 0^+$ is given by:

$$(h_1 * h_2 * \cdots * h_n)^{(i)}(0^+) = \begin{cases} 0, & i = 0, 1, \ldots, n-2 \\ 1, & i = n-1 \end{cases} \quad (5)$$

and we consider $(h_1 * h_2 * \cdots * h_n)^{(0)} = h_1 * h_2 * \cdots * h_n$.

Proof. See Appendix □

In the following we will find a procedure for computing the convolution $h_1 * h_2 * \cdots * h_n$ for $n \geq 2$ and $h_j(t) = \sigma(t)e^{r_j t}$ with $r_j \in \mathbb{C}$ without the need of solving integrals. To begin with, we consider the case where $h_i \neq h_j$ for $i \neq j$, which implies $r_i \neq r_j$ for $i \neq j$.

Theorem 2. The convolution between $n \geq 2$ exponentials signals $\{h_1, h_2, \ldots, h_n\}$, with $h_j(t) = \sigma(t)e^{r_j t}$, $r_j \in \mathbb{C}$ and $h_i \neq h_j$ for $i \neq j$, is given by

$$h_1 * h_2 * \cdots * h_n = A_1 h_1 + A_2 h_2 + \cdots + A_n h_n, \quad (6)$$

where $A_j \in \mathbb{C}$ are scalars that can be computed by solving a linear system $VA = B$ where V is the $n \times n$ (non-singular) Vandermonde matrix defined by $V_{ij} = r_j^{i-1}$, A and B are the n-column vectors $A = (A_1, A_2, \ldots, A_n)$ and $B = (0, 0, \ldots, 1)$, that is:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ r_1 & r_2 & \cdots & r_n \\ r_1^2 & r_2^2 & \cdots & r_n^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_1^{n-1} & r_2^{n-1} & \cdots & r_n^{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

[2] generalized signal δ can be convoluted naturally with any signal as well as with itself.

So, vector A is the last (n-th) column of the inverse of V.

Proof. We use induction on n to prove (6), which is easily verified for $n = 2$ using definition of convolution in Equation (2). Supposing (6) valid for $n = k \geq 2$, and using the fact that convolution is associative we easily prove (6) for $n = k + 1$. To obtain (7) we take the i-th derivative at $t = 0^+$ on both sides of (6) to get:

$$\begin{aligned} (h_1 * \cdots * h_n)^{(i)}(0^+) &= A_1 h_1^{(i)}(0^+) + \cdots + A_n h_n^{(i)}(0^+), \\ & \quad i = 0, 1, 2, \ldots, n-1. \end{aligned}$$

Applying Theorem 1 to left side of equation above and using the fact that $h_j^{(i)}(0^+) = r_j^i$ we get (7).

□

Now we consider the more general convolution $h_1 * h_2 * \cdots * h_n$, $n \geq 2$, where there is the possibility of some h_i to be repeated, that is $h_i = h_j$ for some $i \neq j$. We initially consider some facts about the so-called "n-fold convolution" (or "convolution power" [6], [7]) of exponentials, that is, the convolution of h, as defined in (4), repeated between itself n times, and we represent it by h^{*n}.

Lemma 2.1. The n-fold convolution of $h(t) = \sigma(t)e^{rt}$, is given by

$$h^{*n}(t) = \underbrace{(h * h * \cdots * h)}_{n \text{ terms}}(t) = \frac{1}{(n-1)!} t^{n-1} h(t), \quad n \geq 1 \quad (8)$$

Proof. By induction on n. It is trivially true for $n = 1$ and supposing it valid for $n = k$ we can prove for $n = k + 1$ by writing $h^{*(k+1)} = h^{*k} * h$ and using definition of convolution in Equation (2). □

The Lemma bellow shows a version of Theorem 1 applied to the n-fold convolution of h:

Lemma 2.2. Let be $h(t) = \sigma(t)e^{rt}$, then i-th derivative of $h^{*n}(t)$, $n \geq 1$, computed at $t = 0^+$ is given by:

$$(h^{*n})^{(i)}(0^+) = \binom{i}{n-1} r^{i-n+1} \quad (9)$$

Proof. Equation (9) follows from Lemma 2.1 by setting $k = n - 1$ in the well-known formula bellow:

$$\frac{d^i}{dt^i} \left(\frac{t^k}{k!} e^{rt} \right)_{t=0} = \binom{i}{k} r^{i-k}$$

□

Now we analyse how it would be like the convolution $h_1^{*n_1} * h_2^{*n_2}$, where $h_1(t) = \sigma(t)e^{r_1 t}$ and $h_2(t) = \sigma(t)e^{r_2 t}$, with $r_1 \neq r_2$, that is the convolution between the "n_1-fold" convolution of h_1 with the "n_2-fold" convolution of h_2 when $h_1 \neq h_2$.

Lemma 2.3. Let be $h_1(t) = \sigma(t)e^{r_1 t}$ and $h_2(t) = \sigma(t)e^{r_2 t}$, with $r_1 \neq r_2$, the convolution between the n_1-fold convolution

of h_1 and the n_2-fold convolution of h_2, denoted by $h_1^{*n_1} * h_2^{*n_2}$, is given by:

$$\begin{aligned} h_1^{*n_1} * h_2^{*n_2} &= \underbrace{(h_1 * h_1 * \cdots * h_1)}_{n_1 \text{ terms}} * \underbrace{(h_2 * h_2 * \cdots * h_2)}_{n_2 \text{ terms}} \\ &= (A_1 h_1 + A_2 h_1^{*2} + \cdots + A_{n_1} h_1^{*n_1}) + \\ &\quad + (B_1 h_2 + B_2 h_2^{*2} + \cdots + B_{n_2} h_2^{*n_2}) \end{aligned}$$

Proof. See Appendix. □

Bellow we present a general result about the power convolution of n exponential signals as show in (4) which is a generalization of Theorem 2:

Theorem 3. The convolution between $n \geq 2$ exponential signals $\{h_1, h_2, \ldots, h_n\}$, with $h_i(t) = \sigma(t)e^{r_i t}$, $r_i \in \mathbb{C}$ and q distinct h_s, each of them repeated n_s times, so that $n_1 + n_2 + \cdots + n_q = n$, is given by

$$\begin{aligned} h_1^{*n_1} * h_2^{*n_2} * \cdots * h_q^{*n_q} &= \sum_{j=1}^{n_1} A_{1j} h_1^{*j} + \sum_{j=1}^{n_2} A_{2j} h_2^{*j} + \cdots \\ &\quad + \sum_{j=1}^{n_q} A_{qj} h_q^{*j}. \end{aligned} \tag{10}$$

Alternativelly, by using (8) in Lemma 2.1 we have $h_i^{*j}(t) = \frac{1}{(j-1)!} t^{j-1} h_i(t)$, and then we can rewrite (10) as:

$$h_1^{*n_1} * h_2^{*n_2} * \cdots * h_q^{*n_q} = p_1 h_1 + p_2 h_2 + \cdots + p_q h_q \tag{11}$$

where each p_s, $s = 1, \ldots, q$, is a polynomial defined as

$$p_s(t) = \sum_{j=1}^{n_s} A_{sj} \frac{t^{j-1}}{(j-1)!}$$

and constants $A_{sj} \in \mathbb{C}$ are scalars that can be computed by solving a linear system $VA = B$ where V is the $n \times n$ nonsingular confluent (or generalized) Vandermonde matrix defined by $V = \begin{bmatrix} V_1 & V_2 & \cdots & V_q \end{bmatrix}$, where each block V_s is the $n \times n_s$ matrix whose entries are defined by

$$(V_s)_{ij} = \binom{i-1}{j-1} r_s^{i-j},$$

A and B are the n-column vectors $A = (A_1, A_2, \ldots, A_q)$, each A_s is a n_s-column vector, and $B = (0_1, 0_2, \ldots, B_q)$, where 0_s are n_s-column zero vectors and B_q is the n_q-column vector $(0, 0, \cdots, 1)$ that is:

$$\begin{bmatrix} V_1 & V_2 & \cdots & V_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_1 \\ 0_2 \\ 0_3 \\ \vdots \\ B_q \end{bmatrix} \tag{12}$$

So, vector A is the last (n-th) column of the inverse of V.

Proof. See Appendix. □

III. Analysis of LTI Systems Modeled by Ordinary Differential Equations

Consider a causal LTI system modelled by the following ordinary differential equation

$$y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \cdots + a_1 \dot{y} + a_0 y = u, \quad a_i \in \mathbb{R} \tag{13}$$

where u is the input signal and y is the output signal. The impulse response (h) for this system is given by the convolution:

$$h = h_1 * h_2 * \cdots * h_n, \quad h_i(t) = \sigma(t) e^{r_i t}, \quad r_i \in \mathbb{C}$$

and $r_1, r_2, \ldots, r_n$ are the roots of the characteristic equation $x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \cdots + a_1 x + a_0 = 0$. Supposing that the characteristic equation has q distinct roots r_s, each one repeated n_s times, so that $n_1 + n_2 + \cdots + n_q = n$, then we can obtain the impulse response h by using Theorem 3, Equation (11), that is

$$h = p_1 h_1 + p_2 h_2 + \cdots + p_q h_q \tag{14}$$

where $h_s(t) = \sigma(t) e^{r_s t}$, $p_s(t) = \sum_{j=1}^{n_s} A_{sj} \frac{t^{j-1}}{(j-1)!}$, and A_{sj}, $s = 1, \ldots, q$ and $j = 1, \ldots, n_s$, are calculated by solving the Vandermonde system (12).

On the othe hand, it is well known that the complete solution of differential equation (13) is generally written as

$$y = y_h + y_p \tag{15}$$

where y_h is the homogeneous (or zero input) solution and y_p is a particular solution, i.e., it depends on input signal u. When solving (13) for $t \geq 0$, the particular solution y_p can be written as

$$\begin{aligned} y_p(t) &= \int_0^t u(\tau) h(t-\tau) d\tau = [(\sigma u) * h](t), \\ &\text{where } (\sigma u)(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ u(t), & t > 0 \end{cases} \end{aligned} \tag{16}$$

and h is the impulse response. The homogeneous solution (y_h) has the same format of (14), that is

$$\begin{aligned} y_h &= \bar{p}_1 h_1 + \bar{p}_2 h_2 + \cdots + \bar{p}_q h_q, \\ &\text{where } h_s(t) = e^{r_s t}, \text{ and } \bar{p}_s(t) = \sum_{j=1}^{n_s} \bar{A}_{sj} \frac{t^{j-1}}{(j-1)!}. \end{aligned} \tag{17}$$

Therefore to solve (13) we need to obtain y_p and y_h. To find y_h we use the fact that the particular solution y_p, as shown in (16), is a convolution between $n+1$ signals, namely, "$y_p = (\sigma u) * h = (\sigma u) * h_1 * h_2 * \cdots * h_n$" , and conclude, by using Theorem 1, that:

$$y_p(0^+) = \dot{y}_p(0^+) = \ddot{y}_p(0^+) = \cdots = y_p^{(n-1)}(0^+) = 0$$

and so, using these conditions in (15), we get:

$$\begin{aligned} &y(0^+) = y_h(0^+), \ \dot{y}(0^+) = \dot{y}_h(0^+), \ \ddot{y}(0^+) = \ddot{y}_h(0^+), \cdots, \\ &y^{(n-1)}(0^+) = y_h^{(n-1)}(0^+). \end{aligned}$$

This set of conditions on y_h can be used to find the constants $\bar{A}_{sj}$ in (17) since the "initial values"

$y(0), \dot{y}(0), \ddot{y}(0), \ldots, y^{(n-1)}(0)$ are generally known when solving (13) for $t \geq 0$. This implies that the constants $\bar{A}_{sj}$, $s = 1, \ldots q$ and $j = 1, \ldots, n_s$, can be computed by solving a Vandermonde system like the one showed in Theorem 3, that is $V\bar{A} = \bar{B}$, where the Vandermonde matrix V is the same one used to compute the impulse response h, $\bar{A}$ is the $n \times 1$ vector composed by the $\bar{A}_{sj}$'s and the vector $\bar{B}$, differently from the one used to compute h, it is now defined as $\bar{B} = (y(0), \dot{y}(0), \ddot{y}(0), \cdots, y^{n-1}(0))$.

Finally, in order to obtain the complete solution y for (13) as shown in (15), we need to compute the particular solution "$y_p = (\sigma u) * h$", that is the convolution between the signal σu and the impulse response h. To avoid solving a convolution integral we can use the result of Theorem 3, by writing, if possible, the signal "σu" as a convolution (or a finite sum) of exponential signals of type "$\sigma(t)e^{rt}$", for some $r \in \mathbb{C}$. In this situation, as shown in examples in Section IV bellow, we increase the order of the Vandermonde matrix, as defined in Theorem 3, depending on how many "exponential modes" exists in the input signal "σu".

IV. Resolution of Differential Equations with Exponential Input Signals

In the following we show how to apply results discussed above to solve some specific differential equations:

Example IV-.1. Let be the second order initial value problem (IVP):

$$\ddot{y} + 3\dot{y} + 2y = 1, \quad \text{with } y(0) = -1 \text{ and } \dot{y}(0) = 2. \qquad (18)$$

To find the solution y, we consider the characteristic equation is $x^2 + 3x + 2 = 0$ whose roots are $r_1 = -1$ and $r_2 = -2$ and then $h_1(t) = \sigma(t)e^{-t}$ and $h_2 = \sigma(t)e^{-2t}$

(a) Impulse response (for $t > 0$): $h = h_1 * h_2 = A_1h_1 + A_2h_2$ and then $h(t) = A_1e^{-t} + A_2e^{-2t}$, where A_1 and A_2 are computed as

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \implies \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

which implies $h(t) = e^{-t} - e^{-2t}$, for $t > 0$.

(b) Homogeneous solution: $y_h(t) = B_1e^{-t} + B_2e^{-2t}$, where B_1 and B_2 are computed as:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(0) \\ \dot{y}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 2 \end{bmatrix} \implies \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

which implies $y_h(t) = -e^{-2t}$.

(c) Particular solution (for $t > 0$): $y_p = (\sigma u) * h$, and $(\sigma u)(t) = 1.\sigma(t) = \sigma(t)e^{0t}$, then

$$y_p = (\sigma u) * h = h * (\sigma u) = h_1 * h_2 * h_3$$

where $h_1(t) = \sigma(t)e^{-t}, h_2(t) = \sigma(t)e^{-2t}$ and $h_3(t) = \sigma(t)e^{0t}$, or:

$$y_p(t) = C_1e^{-t} + C_2e^{-2t} + C_3e^{0t}$$

where C_1, C_2 and C_3 are compute as the solution of the "augmented" Vandermonde system:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 0 \\ 1 & 4 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \implies \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}$$

which implies $y_p(t) = -e^{-t} + 0.5e^{-2t} + 0.5$, for $t > 0$.

Finally, the solution for the IVP (18) is $y = y_h + y_p$ or

$$y(t) = -e^{-t} - 0.5e^{-2t} + 0.5, \quad t \geq 0.$$

Example IV-.2. Let be the following IVP

$$\ddot{y} + 4y = t\cos 2t, \quad y(0) = -2, \quad \dot{y}(0) = 4 \qquad (19)$$

whose characteristic equation is $x^2 + 4 = 0$ which implies $r_1 = 2i$ and $r_2 = -2i$ or $h_1(t) = e^{2it}$ and $h_2(t) = e^{-2it}$.

(a) Impulse response: $h(t) = A_1e^{2it} + A_2e^{-2it}$, and

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 2i & -2i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \implies \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.25i \\ 0.25i \end{bmatrix}$$

Then

$$h(t) = -025ie^{2it} + 0.25ie^{-2it} = 0.5\sin 2t.$$

(b) Homogeneous solution: $y_h(t) = B_1e^{2it} + B_2e^{-2it}$, and

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 2i & -2i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 \\ 4 \end{bmatrix} \implies \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 - i \\ -1 + i \end{bmatrix}$$

Then

$$y_h(t) = (-1-i)e^{2it} + (-1+i)e^{-2it} = -2\cos 2t + 2\sin 2t$$

(c) Particular solution: $y_p = (\sigma u) * h$, and $u(t) = t\cos 2t = t(e^{2it} + e^{-2it})/2$, or:

$$u = 0.5(u_1 + u_2), \quad u_1(t) = te^{2it}, \quad u_2(t) = te^{-2it}$$

and so, $y_p = 0.5(\sigma u_1) * h + 0.5(\sigma u_2) * h$. Since $u_1(t) = te^{2it}$ and $u_2(t) = te^{-2it}$, we have

$$\begin{aligned} \sigma u_1 &= h_3 * h_3, \quad h_3(t) = \sigma(t)e^{2it} \\ \sigma u_2 &= h_4 * h_4, \quad h_4(t) = \sigma(t)e^{-2it} \end{aligned}$$

Therefore

$$(\sigma u_1) * h = h_1 * h_2 * h_3 * h_3 \text{ and } (\sigma u_2) * h = h_1 * h_2 * h_4 * h_4$$

where

$$h_1(t) = h_3(t) = \sigma(t)e^{2it}, \quad h_2(t) = h_4(t) = \sigma(t)e^{-2it}$$

and then

$$\begin{aligned} ((\sigma u_1) * h)(t) &= C_0e^{-2it} + p(t)e^{2it}, \\ ((\sigma u_2) * h)(t) &= D_0e^{2it} + q(t)e^{-2it}, \end{aligned}$$

where

$$p(t) = C_1 + C_2t + C_3t^2/2 \text{ and } q(t) = D_1 + D_2t + D_3t^2/2$$

So we have

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ -2i & 2i & 1 & 0 \\ -4 & -4 & 4i & 1 \\ 8i & -8i & -12 & 6i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \implies$$

$$\begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.015625i \\ 0.015625i \\ 0.0625 \\ -0.25i \end{bmatrix}$$

and

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 2i & -2i & 1 & 0 \\ -4 & -4 & -4i & 1 \\ -8i & 8i & -12 & -6i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_0 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \implies$$

$$\begin{bmatrix} D_0 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.015625i \\ -0.015625i \\ 0.0625 \\ 0.25i \end{bmatrix}$$

Since $y_p = 0.5(\sigma u_1) * h + 0.5(\sigma u_2) * h$ we have, after regrouping the terms

$$y_p(t) = -0.03125 \sin 2t + 0.0625t \cos 2t + 0.125t^2 \sin 2t$$

and the solution $y = y_h + y_p$ will be given by

$$\begin{aligned} y(t) &= 1.96875 \sin 2t - 2 \cos 2t + 0.0625t \cos 2t + \\ &+ 0.125t^2 \sin 2t, \quad t \geq 0 \end{aligned}$$

V. Conclusion

We showed in this paper a technique for computing the convolution of exponential signals, that avoids the need of solving integrals. The method is essentially algebraic and requires the resolution of Vandermonde systems, which is a well-known and extensively discussed problem in literature (see e.g. [8] and references therein). As discussed in [8, pp. 182], there exists efficient computational algorithms for solving Vandermod systems that gives accurate solution even when the Vandemond Matrix is ill-conditioned.[3] The proposed approach can be useful for the analysis of LTI systems in time domain as well as an alternative technique to solve ordinary differential equations with constant coefficients in a very simple way, and we believe it can be teached in a first course on linear systems theory. We note that the question of computing convolution of exponentials have been discussed previously in literature ([10], [11]), but the proposed approach is apparently different from the previous ones, and additionally is quite simple and suitable to be implemented computationally. Finally we note that the presented results can be extended to discrete-time context, where the exponential signal is now a function $f : \mathbb{Z} \to \mathbb{C}$, defined by $f(k) = a^k$, with $a \in \mathbb{C}$. Similar results can be obtained for the convolution of these signals as well as for the analysis of discrete time LTI systems and for the solution of difference equations (see [2]).

[3]Conditioning of Vandemond Matrix, as shown in (7), depends on position of its "nodes" r_i in complex plane (see [9] for a detailed discussion).

References

[1] Wikipedia: The Free Encyclopedia. Wikimedia Foundation, Inc. 21 Dec. 2017. Web. 21 Dec., 2017. Available at https://en.wikipedia.org/wiki/Convolution.

[2] F. Mota. *Computing the Convolution of Analog and Discrete Time Exponential Signals Algebraically*. arXiv:1606.08072v1, 2016.

[3] Scilab Enterprises. Scilab: Free and Open Source Software for Numerical Computation. Orsay, France, 2012. Available at http://www.scilab.org.

[4] W. Rudin. Functional Analysis, Second Edition. International Series in Pure and Applied Mathematics. McGraw-Hill, Singapore, 1991.

[5] G. Grubb. *Distributions and Operators*. Graduate Texts in Mathematics (Book 252). Springer Science+Business Media, LLC, NY, 2009.

[6] K. L. Chung. *Elementary Probability Theory with Stochastic Processes*. Third Edition. Springer-Verlag NY Inc., 1979.

[7] Wikipedia: The Free Encyclopedia. Wikimedia Foundation, Inc. 4 June 2016. Web. 21 June, 2016. Available at http://en.wikipedia.org/wiki/Convolution_power.

[8] G. H. Golub and C. F. Van Loan. *Matrix Computations*. Second Edition. The Johns Hopkins Univ. Press, 1989.

[9] W. Gautschi. *How (Un)stable Are Vandermonde Systems?* In Asymptotic and Computational Analysis, pp. 193–210. Lectures Notes in Pure and Applied mathematics. R. Wong, Ed. Marcel Dekker, 1990.

[10] M. Akkouchi. *On The Convolution of Exponential Distributions*. Journal of The Chungcheong Mathematical Society, Vol. 21, No. 4, December 2008.

[11] N.-Y. Ma, F. Liu. *A Novel Analytical Scheme to Compute the n-Fold Convolution of Exponential-Sum Distribution Functions*. Applied Mathematics and Computation, 158 (2004) 225–235.

Appendix

1) Proof of Theorem 1: We note that $(h_1 * h_2 * \cdots * h_n)(0^+) = 0$ if $n \geq 2$, since this involves an integration of exponentials over an infinitesimal interval; this proves that $(h_1 * h_2 * \cdots * h_n)^{(0)}(0^+) = 0$. Now consider $(h_1 * h_2 * \cdots * h_n)^{(i)}$ for $1 \leq i \leq n-2$:

$$\begin{aligned} (h_1 * \cdots * h_n)^{(i)} &= (\dot{h}_1 * \cdots * \dot{h}_i) * \underbrace{(h_{i+1} * \cdots * h_n)}_{\text{at least two terms}} \\ &= \underbrace{[(\delta + r_1 h_1) * \cdots * (\delta + r_i h_i)]}_{\delta + f} * \\ &\quad * (h_{i+1} * \cdots * h_n) \\ &= (\delta + f) * (h_{i+1} * \cdots * h_n) \\ &= (h_{i+1} * \cdots * h_n) + \\ &\quad + f * (h_{i+1} * \cdots * h_n) \end{aligned}$$

Since the two terms in sum $(h_{i+1} * \cdots * h_n + f * h_{i+1} * \cdots * h_n)$ above are composed by a convolution of at least two signals, we conclude that $(h_1 * h_2 * \cdots * h_n)^{(i)}(0^+)$ is equals to zero. Now, considering $i = n-1$, we have:

$$\begin{aligned} (h_1 * \cdots * h_n)^{(n-1)} &= (\dot{h}_1 * \cdots * \dot{h}_{n-1}) * h_n \\ &= (\delta + r_1 h_1) * \cdots \\ &\quad * (\delta + r_{n-1} h_{n-1}) * h_n \\ &= (\delta + f) * h_n = \delta * h_n + f * h_n \\ &= h_n + f * h_n, \end{aligned} \tag{20}$$

and since $f * h_n$ is a sum of (at least) two signals convolution, we have that $(f * h_n)(0^+) = 0$ and consequently we obtain from (20):

$$(h_1 * h_2 * \cdots * h_n)^{(n-1)}(0^+) = (f * h_n)(0^+) + h_n(0^+) = 1$$

□

Remark 1. The result of Theorem 1 can of course be extended to any set differentiable signals, other than exponentials. By considering $h_i = \sigma f_i$, where f_i is differentiable, we will get the following generalization of Equation (5):

$$(h_1 * h_2 * \cdots * h_n)^{(i)}(0^+) = \begin{cases} 0, & i = 0, 1, \ldots, n-2 \\ \prod_{j=1}^{n} f_j(0), & i = n-1 \end{cases}$$

2) Proof of Lemma 2.3: We prove by induction on (n_1, n_2). It is obviously true for $(n_1, n_2) = (1, 1)$.

1) Induction on n_1: Valid for $n_1 = k$ and $n_2 = 1$. Let it be $n_1 = k + 1$:

$$\begin{aligned} & h_1^{*(k+1)} * h_2 = h_1 * (h_1^{*k} * h_2) = \\ & h_1 * (A_1 h_1 + A_2 h_1^{*2} + \cdots A_k h_1^{*k} + B_1 h_2) = \\ & A_1 h_1^{*2} + A_2 h_1^{*3} + \cdots A_{k+1} h_1^{*(k+1)} + B_1 (h_1 * h_2) = \\ & A_1 h_1^{*2} + A_2 h_1^{*3} + \cdots A_{k+1} h_1^{*(k+1)} + B_1 (C_1 h_1 + C_2 h_2) = \\ & (B_1 C_1) h_1 + A_1 h_1^{*2} + A_2 h_1^{*3} + \cdots \\ & + A_{k+1} h_1^{*(k+1)} + (B_1 C_2) h_2 \end{aligned}$$

2) Induction on n_2: Valid for generic n_1 and $n_2 = k$. Let it be $n_2 = k+1$: Since $h_1^{*n_1} * h_2^{*(k+1)} = (h_1^{*n_1} * h_2^{*k}) * h_2$, then:

$$\begin{aligned} & (h_1^{*n_1} * h_2^{*k}) * h_2 = \\ & \big[(A_1 h_1 + A_2 h_1^{*2} + \cdots + A_{n_1} h_1^{*n_1}) + \\ & (B_1 h_2 + B_2 h_2^{*2} + \cdots + B_k h_2^{*k}) \big] * h_2 = \\ & \underbrace{A_1 (h_1 * h_2) + A_2 (h_1^{*2} * h_2) + \cdots + A_{n_1} (h_1^{*n_1} * h_2)}_{\text{Rearranged as } (C_1 h_1 + C_2 h_1^{*2} + \cdots + C_{n_1} h_1^{*n_1} + D h_2)} + \\ & + B_1 h_2^{*2} + B_2 h_2^{*3} + \cdots + B_k h_2^{*(k+1)} = \\ & C_1 h_1 + C_2 h_1^{*2} + \cdots + C_{n_1} h_1^{*n_1} + \\ & + D h_2 + B_1 h_2^{*2} + B_2 h_2^{*3} + \cdots + B_k h_2^{*(k+1)} \end{aligned}$$

□

3) Proof of Theorem 3: We use induction on q to prove (10), which is valid for $q = 2$, as shown in Lemma 2.3. Suppose (10) is valid for $q = k$, and we prove it for $q = k+1$:

$$\begin{aligned} & h_1^{*n_1} * h_2^{*n_2} * \cdots * h_k^{*n_k} * h_{k+1}^{*n_{k+1}} = \\ & (h_1^{*n_1} * h_2^{*n_2} * \cdots * h_k^{*n_k}) * h_{k+1}^{*n_{k+1}} = \\ & \left(\sum_{j=1}^{n_1} A_{1j} h_1^{*j} + \sum_{j=1}^{n_2} A_{2j} h_2^{*j} + \cdots + \sum_{j=1}^{n_k} A_{kj} h_k^{*j} \right) * h_{k+1}^{*n_{k+1}} = \\ & \sum_{j=1}^{n_1} A_{1j} (h_1^{*j} * h_{k+1}^{*n_{k+1}}) + \sum_{j=1}^{n_2} A_{2j} (h_2^{*j} * h_{k+1}^{*n_{k+1}}) + \cdots \\ & + \sum_{j=1}^{n_k} A_{kj} (h_k^{*j} * h_{k+1}^{*n_{k+1}}) = \\ & \sum_{j=1}^{n_1} B_{1j} h_1^{*j} + \sum_{j=1}^{n_2} B_{2j} h_2^{*j} + \cdots + \sum_{j=1}^{n_k} B_{kj} h_k^{*j} + \\ & + \sum_{j=1}^{n_{k+1}} B_{(k+1)j} h_{k+1}^{*j} \end{aligned}$$

and the (10) is proved. To prove (12) we take the i-th derivative at $t = 0^+$ on both sides of (10) to get:

$$\begin{aligned} & (h_1^{*n_1} * h_2^{*n_2} * \cdots * h_q^{*n_q})^{(i)}(0^+) = \\ & \sum_{j=1}^{n_1} A_{1j} (h_1^{*j})^{(i)}(0^+) + \sum_{j=1}^{n_2} A_{2j} (h_2^{*j})^{(i)}(0^+) + \cdots \\ & + \sum_{j=1}^{n_q} A_{qj} (h_q^{*j})^{(i)}(0^+), \quad i = 0, 1, 2, \ldots, n-1. \end{aligned}$$

Applying Theorem 1 to left side of equation above and using Lemma 2.2, i.e., for $j \geq 1$:

$$(h_s^{*j})^{(i)}(0^+) = \binom{i}{j-1} r_s^{i-j+1}$$

we get (12). □

Software Defined Radio: From Theory to Real World Communications

Víctor González-Barbone, Pablo Belzarena and Federico Larroca
Instituto de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería, Universidad de la República
Montevideo, Uruguay
{vagonbar,belza,flarroca}@fing.edu.uy

***Abstract*—Bridging the gap from theory to real-world, hands-on experience is an always present challenge in Education. The advent of computers allowed for simulation, a halfway step from theory into practice. In Telecommunications Engineering, Software Defined Radio allows students to design and test wireless equipment in real communication by means of a personal computer connected to a simple, low cost, generic radiofrequency device. The paradigm has changed the approach to wireless equipment and communications protocols design across industry and academia. In Education, it has succeeded in providing students with an experience very similar, if not equal, to what they will face in their professional lives. This approach resulted in a deeper understanding and better ability development than was possible through simulation, since several communication problems (such as those related to radiofrequency propagation) are very difficult to model realistically. Moreover, this approach has proved to be strongly motivating for students, who design systems through a graphical interface by interconnecting blocks with specific functionality, but can later experience the results in real communications. This article describes our teaching experience and lessons learned with Software Defined Radio for Engineering Education. We used GNU Radio, an open and free software framework, complemented with GNU Wireless Network, an extension of our design to support data communications. The paradigm involved both graduate and undergraduate courses in Wireless Communication with strong lab content, undergraduate projects, early research training, and several master thesis.**

***Index Terms*—Engineering Education, Software Defined Radio, GNU Radio, Wireless Communications, Wireless Data Networks, Research Training**

I. Introduction

Engineering Education faces the ever present challenge of preparing students for real world situations in an environment which only imitates reality: models and lab experiments are very mild experiences compared to the demands of real life situations.

Wireless communication problems are very difficult to model realistically; some experimentation is needed. Mounting a Communications Engineering laboratory calls for a variety of communications equipment which is specific for different purposes, proprietary, expensive, and sometimes very expensive.

The scaling in computer hardware and software capabilities brought in a new tool: simulation. Simulations have proved a valuable teaching tool, but realistic simulation at the physical level becomes extremely difficult.

Software Defined Radio (SDR) is a radio communications system in which functions traditionally implemented in hardware are instead performed by software, for example in an ordinary personal computer. In this way, a personal computer with an generic, low cost, USB connected radiofrequency device, can be used as a communications equipment capable of interacting in a wide variety of communications systems, such as television, AM and FM radio, and others.

Software Defined Radio has changed the way communications systems are designed: the paradigm has been adopted and is increasingly extending as the preferred research and development tool in industry [7], [10], [33]. Since the tools are within reach of even modest university budgets, besides bridging the gap between theory and practice, students work in an environment very similar to the one they will find in industry, which allows them to become productive almost immediately. Until recently, it was practically impossible to provide students with an industry-like experience within school.

GNU Radio (GR) [12] and GNU Wireless Network (GWN) [15] are open and free implementations of SDR; GR is oriented towards broadcast as in radio and TV, GWN is an extension towards data networks of our development. Both GR and GWN are apt for simulation, but they also work in real world communication. Students can thus experiment real world communication problems. Moreover, a well tested project can pave the way to an industrial development.

Computers have brought unexpected possibilities to Education. In this case, successfully bridging the gap from theory to practice, and re-creating in academia the same environment students will find in their professional lives have been long cherished achievements.

The former considerations led the authors and some colleagues to try SDR along with GR and GWN as educational tools. This article discusses our efforts towards their adoption, its advantages (and disadvantages) and lessons learned along the way. We also present several resources which may be easily duplicated in other Universities (such as GWN), in the hope that they will be useful for other similar undertakings.

This article is organized as follows. Software tools for SDR, hardware alternatives, and a review of some former experiences of their use in Education are first described. This

This work was partially funded by Universidad de la República's CSIC GRUPOS program.

is followed by an introduction to GR and GWN. The use, characteristics and some shortcomings of GR are analyzed in Sec. III. After a short summary on data networks needs, features provided by GWN are explained in Sec. IV, both to support data networks and to overcome some of the GR shortcomings. As we discuss in Sec. V, GR and GWN were used as teaching tools in courses, assignments, and students projects, but also in research. Results and discussion of these experiences in Sec. VI help define our future work in the design of upcoming courses, in graduate students projects, and in GWN enhancements. Some conclusions on how the SDR paradigm helped to face the challenges of Engineering Education end this article.

II. Software Defined Radio

A. Software tools

In SDR, instead of processing a continuous-time signal (such as the voltage generated by an antenna), periodic samples of this signal are instead processed by the personal computer. Samples are obtained from a generic wireless device connected via USB or Ethernet, which may be arbitrarily processed by the computer. Conversely, samples generated in the computer are transmitted through this device. This enables almost any type of wireless link, including AM/FM radio, analog and digital TV, cell phones, and WiFi.

GR and its extension, GWN, are free and open SDR implementations which provide a graphical interface where blocks can be interconnected to perform the necessary signal and message processing. GR was designed for and (mostly) implements continuous communications such as radio and TV, while GWN extends GR to support protocols for packet communications.

GR provides a set of blocks to perform well known signal processing tasks, as well as interact with the operating system of the computer and the communications hardware. One of these hardware devices is the Universal Software Radio Peripheral (USRP) by Ettus Research, a subsidiary or National Instruments [9].

Results obtained in a GR based testbed can be expected to improve in a hardware implementation of the same flowgraph, mainly because of the much faster time responses and the dedicated, specific character of the hardware implementation. This allows an inexpensive way of testing a prototype, avoiding the high costs of hardware prototyping, out of reach for many universities, specially in underdeveloped countries.

GR is free and open, and the repository can be installed locally using several different options [11]. GWN is also free and open and can be cloned locally from the Github repository [16]. Other tools such as the Python programming language and C++ are also free and widely available. GR, GWN and all our developments were carried out under the Linux operating system, also free and widely available; several versions exist, and were actually used, according to device capabilities, e.g. Raspbian [28] and Arch Linux [2] for small capabilities devices, XUbuntu [35] for PCs.



Fig. 1. Hardware devices used: USRP, BladeRF, HackRF, Raspberry Pi, robot.

B. Hardware alternatives

Usual RF peripheral devices for GR and GWN are: USRPs by Ettus Research, from $ 775 for the USRP bus series [9]; BladeRF from $ 420 [25]; Great Scott Gadgets HackRF One for $ 300 [30]; receive-only dongles can be bought by less than $30 [29]. The cost of a traditional RF equipment to test wireless communications may well go far into the thousands of dollars.

SDRs such as GR and GWN run on personal computers, but some undemanding developments can be run on smaller, lower cost devices. Raspberry Pi is a credit-card sized single-board computer built by the Raspberry Pi Foundation [27]; the latest model can be bought by $ 40; a complete starter kit costs $ 75. Raspberry Pi size and power requirements allow mounting it on an autonomous device such as a robot. A robot car kit can be bought by less than $ 100. GWN was installed on a robot car equipped with a Raspberry Pi and an USRP RF card; the robot could thus be controlled from a personal computer with a similar USRP RF card. Smaller devices are becoming increasingly powerful: the ODROID-XU4 compares with a personal computer, running Ubuntu Linux 15.04 or Android 4.4 in a size of 82 x 58 x 22 mm, fan cooler included, at a cost of $ 74.00 [18]. Figure 1 shows some of the hardware devices used in our experiments.

C. Some milestones of SDR in Education

The advent of SDR into Education was made possible mostly by two factors: increase in the capabilities of ordinary personal computers, and the reduction in cost of radio frequency peripherals, from year 2000 on [24]. Use of SDR in Education dates from 2010 and has consistently increased.

For instance, use of SDR for undergraduates held at the School of Engineering at Stanford University was considered very promising, and was ranked by the students among the best at the school [22]. In fact, several U.S. universities recognize the value of SDR as an integrative construct for the various disciplines involved in electrical engineering curricula [4]. Moreover, in 2012 and 2013 SDR drew the attention of the IEEE Global Communications Conferences (GLOBECOM), and the 2014 edition of IEEE Communications Magazine

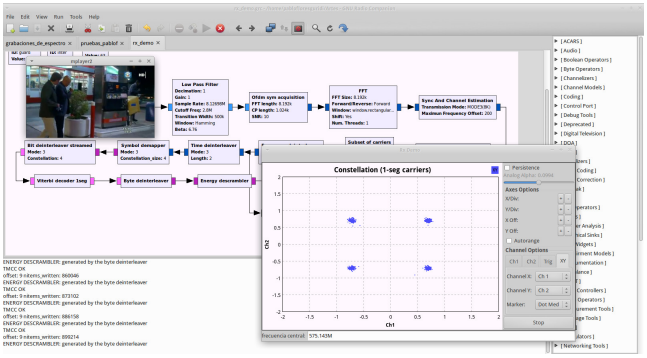


Fig. 2. gr-isdbt, an ISDB-T standard television receiver; the screen capture shows the GR graphical interface, the interconnection of blocks in a flowgraph, the constellation of symbols in the signal, and the TV image being analyzed.

started a feature topic on Communications Education and Training publishing three articles on SDR in Education [24].

The use of SDR in the limited time of undergraduate courses faces the challenge of a steep learning curve. This was overcome in the experience described in [34] by structuring learning units with theoretical preparation and simulation before facing GNU Radio SDR experimentation, together with the use of Simulink [23], a graphical programming environment for modelling and simulation. Students found labs rather excessive in terms of work, but also found the SDR paradigm quite interesting [34]. Regarding junior researchers, SDR has been successfully used to involve undergraduate studies in research and motivate them to follow graduate level studies [6].

A survey of the capabilities and challenges offered by the USRP hardware platform for Education can be found in [8]. All in all, SDR is nowadays recognized as a reliable tool for telecommunications engineering, having changed the way industry faces technical challenges in telecommunications systems. Rapid prototyping of radio solutions, and their testing in real-world conditions, together with their availability and ease of use, explain the value given to SDR in industry, academia and government [33] [26].

III. Working with GNU Radio (GR)

A. GNU Radio in use

In GR, a communications application is implemented as a flowgraph, i.e. a set of interconnected blocks. Each block performs a specific function, has some inputs and outputs, and parameters to be set. GR blocks are coded in C++, but Python can also be used, allowing for rapid prototyping. GR accepts development in both languages in a seamless fashion. These flowgraphs may be constructed by programming (either Python or C++) or through the so-called GNU Radio Companion (GRC), the GR graphical interface.

Figure 2 shows a running flowgraph, where a digital TV channel is tuned, and the "constellation" of symbols in the signal is shown (together with the received video). Some of the blocks used are part of gr-isdbt, a GR Out-of-Tree module (see the next subsection) for digital television reception [21].

The collection of blocks included in the standard GR distribution is quite varied, and allows to experiment signal processing tasks, emulate a communications link using a channel emulator block (no RF peripheral required), and establish real communications.

B. GNU Radio modularity and extension

The GR architecture has been designed to be extensible: users can add new blocks in groups called out-of-tree modules, which can be used exactly as blocks in the main stream of development, while not interfering with them [13].

Our own gr-isdbt project is an example of a pure GR research and development achievement. gr-isdbt is a GR based digital television receiver implementing ISDB-T, the standard used in most Latin American countries. The implementation is open, free, and entirely in software (see [1]), the only necessary piece of hardware being any of those mentioned before (even cheap dongles). This application allows broadcasting professionals and researchers to use a low cost, real-time working receiver on which several measures relevant to signal quality of reception can be made, thus avoiding the need for expensive digital television equipment [21].

This development was carried out by a team of senior and junior researchers, with several graduation projects and a master thesis carried out around the project. These achievements show the feasibility of promoting developments towards the early training of junior students as researchers. Moreover, the working receiver was used in several demonstrations of key concepts during teaching (e.g. OFDM, synchronization, BER, etc.), with the clear advantage of working with a communication system that is both real and well-known to students. Implementations of other DTV standards (e.g. DVB-T or ATSC) are already part of GNU Radio, so this kind of demonstrations may be carried out almost anywhere on the globe.

C. GNU Radio shortcomings

The use of GR in Education has to deal with some shortcomings of a project not primarily designed as a learning tool.

Documentation is scarce. There is a collection of tutorials to help new users install and use GR [14], and a number on some specific topics, but documentation on blocks is scanty, sometimes limited to programmers comments in the code [11].

Pace of development is fast, versions change frequently, compatibility with former versions is not guaranteed. Last versions tend to be more stable, though.

Though there exist data networks implementations based on GR, they are very specific, generally partially implementing a data communications protocol in particular, such as [5]. GWN attempts to provide a design paradigm and toolkit to ease the implementation of existing or experimental communications protocols. To this purpose, GWN adds timing facilities and a generic FSM (Finite State Machine), and a generic block to include them; this generic block can be specialized at will for any purpose, from demonstration to industry developments. Besides, GWN attempts to overcome some GR shortcomings for teaching in data network courses.

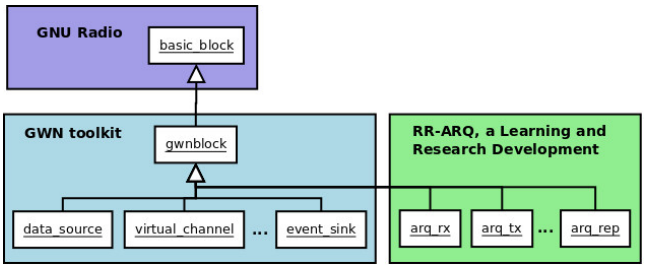


Fig. 3. The GWN toolkit provides a generic gwnblock which inherits from GR basic_block. All GWN toolkit blocks and blocks developed by students and researchers inherit from gwnblock. RR-ARQ is a students implementation of Automatic Repeat reQuest (ARQ), an error control protocol for data transmission.

IV. GNU Wireless Network (GWN)

A. Data networks requirements

GR and SDR come from radio frequency communications such as radio and TV, where the electromagnetic spectrum is divided in channels, and information is conveyed in a continuous flow. Data networks use a shared medium with several actors communicating at the same time, information is conveyed in discrete data units called packets, these packets may be corrupted, suffer variable delays, arrive in disorder, or be lost entirely. These and other problems are addressed in a number of standard which regulate network communication, from small local area networks to the Internet. IEEE 802.11 is one such protocol, commonly known as WiFi.

GR was originally stream oriented, but recently added support for message communications. GWN uses message communication to extend GR for its use in data networks, not tied to any specific protocol, but as a toolkit for experimentation and development.

B. GWN Architecture

GWN extends GR towards data networks in a toolkit with its own features. Blocks in GWN and GR can be mixed in the same flowgraph. GWN provides a generic gwnblock which adds the tools necessary for data network designs, decoupled from the GR generic basic_block. A new GWN block only needs to inherit from gwnblock and follow GWN design rules, shielding from users most of the complexity of GR.

The GWN toolkit also includes common function blocks such as message sources and sinks, a channel emulator, message converters, and framers. Figure 3 shows how learning and research developments need only interact with GWN in their construction. This architectural scheme simplifies access of students to development.

The GWN generic block adds the following facilities to GR.

- Message orientation. GR is stream oriented, GWN is message oriented; items interchanged among GWN blocks are discrete groups of bytes. GWN makes use of the message mechanism of GR, but provides some blocks to interact with stream GR blocks when necessary.
- Events. GWN elaborates on the message interchange mechanism of GR into a more structured item of interchange called an event. GWN blocks interchange events. The event inner structure reflects the needs of network data protocols and is closer to their design conception.
- Handling of time. This is a feature absent in GR, and essential in data networking. Answers are waited for a certain time, keep-alive signals are emitted at regular intervals; timing pervades data communications. GWN provides two forms of handling time: timeouts and timers. A timeout just waits for some time and emits a timeout event; it is a one-shot gun. A timer emits timing events regularly.
- Finite State Machines. Most data communication protocols involve a complex logic usually described in a mathematical model of computation called a Finite State Machine (FSM). An FSM comprises states and transitions, and reacts to events: when the machine is in a certain state and receives an event, a transition to another state is performed, optionally with some parallel task. GWN includes a simplified version of an eXtended Finite State Machine (XFSM) which has been used to implement complex packet processing tasks inside network switches, and is considered a powerful enough tool to implement any protocol for data networks [3].

C. GWN example applications

GWN allows a step by step construction, ideal for showing and experimenting how each block performs its duty. The simplest flowgraph is an event source connected to an event sink: events produced in the first block are displayed by the second. From this on, gradual addition of blocks may lead to the simulation of a transmission over air, using a channel emulator block in place of peripherals and air. Finally, two computers can be interconnected, and start a chat session, a file transfer, or a graphical application in the remote machine. Figure 4 shows the flowgraph to establish a bilateral link with another node. Along the former lines, data network protocols can be implemented, tested, and improved, starting from simulation and ending in real world communications.

Another tested application consisted in installing a Raspberry Pi card and an USRP card on a robot car. The Raspberry Pi was running a Linux version as operating system, and GWN. The robot was controlled from a personal computer with a similar USRP device. The robot could be controlled remotely, making it go forward and backwards at different velocities, and make turns, using the arrow keys in the computer.

Many different such experiments are possible. For example, a group of robots can be directed to do all the same thing, but to coordinate actions, say to achieve some predetermined formation, they must inform their positions in some way. To allow this multi-node communications a data communications protocol must be implemented.

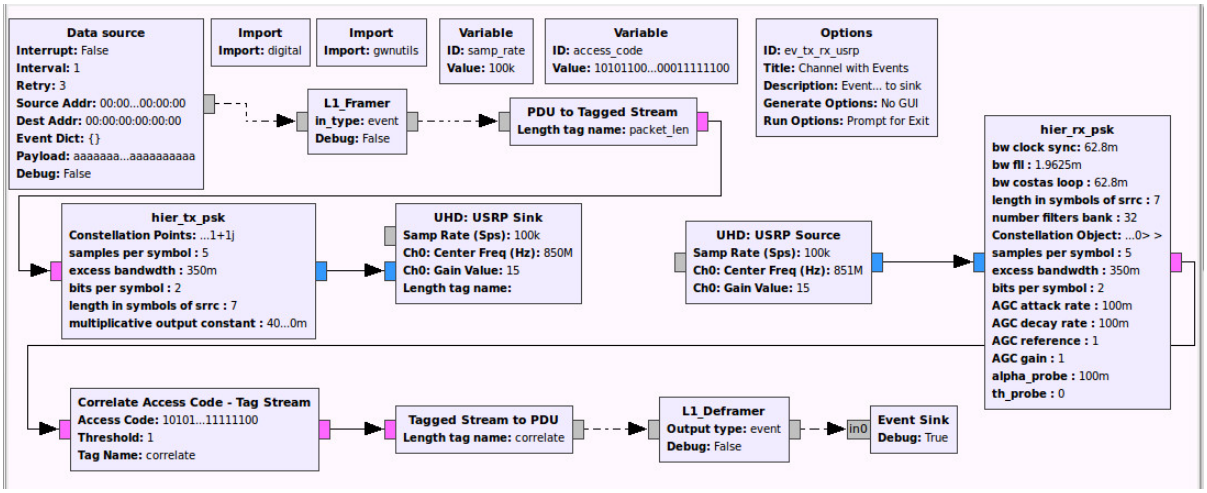


Fig. 4. Flowgraph to establish a bilateral link with another node. Data source blocks sends messages at regular events into the USRP sink, which interacts with the RF device which puts the signal on air. At the same time, this node is receiving messages through the USRP source, which captures the signal from air.

V. GR AND GWN AS TEACHING TOOLS

Our integration of SDR into Education was carried out along the following trends, in chronological order.

The first step we took, some seven years ago, was to implement a graduate course on Wireless Communications, conceived mainly to bridge the gap between theory and practice [19]. The objective was to become familiar with the SDR equipment and its operation, both students and teachers. At this stage, students have already gone through courses in Communications Systems, Signal Processing, and Antennas. Although they have a solid background in the theoretical aspects of Wireless Communications, their knowledge on specific, real world applications and problems is limited.

The course reviews the essentials of the theory behind each communications function or problem (e.g. coding or synchronization) before dealing with the different possible solutions, most of which can be demonstrated or experimented through SDR. Several homework assignments (or take-home labs) implemented in GR which illustrate these problems are included in the course. At the same time they are used to incrementally construct a complete transceiver which is tested in real-life as the final lab.

The course is also evaluated with a small final project, where a specific application of their choice is experimented in SDR (either by using OOTs or implementing their own flowgraphs). For instance a GPS in a personal computer, a transmitter and receiver implementing the IEEE 802.11 protocol (WiFi), receive a TV signal in protocol ISDB-T, a data communications link with error control using ARQ (Automatic Repeat Query), or a decoder for the X.25 amateur radio protocol used in satellites.

Usually the course is perceived by the students as difficult; it is assumed to require more study hours than credit equivalent alternatives. However, students demonstrating their assignments show a sound knowledge of the technology behind their task, and are eager to discuss all aspects of the project, with an unmistakable pride in their achievements.

During the course, we rapidly realized that a real and deep understanding of GR was necessary and that in order to achieve this a relatively ambitious project had to be undertaken. gr-isdbt, which we discussed above, was our first. This project was followed by GWN, originated in the lack of networking support of GR.

Though GWN is used for demonstrations in the classroom (e.g. losses and corruption of messages, both in simulation and real word communications), it excels in the lab, where students can interact freely with it. Since use of GWN in projects and research demands knowledge and some expertise in some other subjects, to speed up acquisition of these abilities students were given a detailed plan to follow on their own. Moreover, GWN remedies some of the shortcomings of GR: documentation of blocks is quite complete, tutorial information is given in the projects wiki [17], example flowgraphs are available after installation, and also on the project's homepage [16]. We have further entrusted these students with the implementation of some extensions of GWN, adding blocks for new functionalities. The goal here was twofold: the implementation per se and the early training of students in research.

In parallel to these steps, we started demonstrating common applications through SDR, such as an FM receiver, in undergraduate courses on communications. These were met with enthusiasm by students, which encouraged us to migrate all the labs in those courses from MATLAB to GR. In this case, we provided already complete and working flowgraphs, which produced a graphical interface where real-time experiments could be performed (i.e. how the SNR affects BER, where the constellation and noise power could be controlled). Exploration of GR and GRC was encouraged but not required, since the focus was on illustrating these concepts.

The next step was naturally to use SDR in a more cen-

tral role in an undergraduate course: three years ago we implemented an introductory course on analog modulation completely around GRC and cheap dongles. Students have only taken a basic course on signal and systems (during the same semester they are taking a digital processing course), and the objective is to implement a stereo FM receiver and transmitter at the end of the semester. Along the way, several key concepts are reviewed (e.g. Fourier analysis or bandwidth) but students are only assisted by teachers: they work in groups and are encouraged to discuss among them and look up study material on their own. All the material (in spanish) may be found in [32].

A. Results and discussion

To date, the Wireless Communications course has seen several editions, with satisfactory results. The students' final achievements show a mature ability to transit from theory into practice, which can be easily attributed at the readiness of the experimentation media, i.e. SDR and GR.

Research training involved advanced undergraduate students for two semesters, with a dedication of 260 and 300 hours, which means about two full time months to train students into GWN, Python language and accessory tools included.

Proficiency gained was considered satisfactory: students showed to have acquired the ability to use several different tools (programming language, development environment, version control system, extension mechanisms), and apply them both to demonstrate known results and explore new alternatives.

Perhaps the result which deserves most attention is motivation, in a context of decreasing interest in technical careers in spite of the high demand for professionals in several areas, telecommunications included. Students experimenting in real situations what they knew in theory grew gradually more enthusiastic and eager to follow their studies.

The former results confirmed that some practical, motivating educational proposal was needed to show telecommunications in action, to involve students not only in the know-hows of the discipline but also in what are open questions and research areas.

VI. Present research trends and future work

As mentioned before, one of the most challenging aspects of SDR is the broad knowledge required to use it effectively (programming, signal processing, communication theory, etc.). However, the sense of reality it brings into the classroom is very appealing and motivating for students. We are thus working on how to introduce SDR as early as possible in the career.

Some years ago our University started offering an entry level workshop intended to provide electrical engineering students with a very early feeling of hands-on experience [31]. Along several editions, a growing popularity of the workshop and a consistent increase in the number of students opting for Electrical Engineering show the value of the early introduction of real world experiences. We are currently implementing an edition around SDR and the reception of ADS-B signals (Automatic Dependent Surveillance Broadcast). In any case, the challenge is to allow the students to use SDR as a tool, and hide all unnecessary (at this stage) complications.

We are also working on a complete website which includes a traditional book on Wireless Communications (basically the notes we wrote for our course), but complemented with several GR activities. Our work in progress, licensed under Creative Commons, is available on [20].

Research, development and experimentation, both in data networking and education, have shown a worthwhile road to follow. Besides publishing GWN version 1.0 as a rounded-up proposal to try in education, research and development, our present goal is to widen the reach of our research in several directions:

- installation in other hardware devices, in particular small ones to enable data communications with robots, sensors and the like.
- operating systems and other software alternatives: many small devices cannot support a full operating system; alternatives such as ArchLinux allow a very selective, hence efficient, installation.
- robots, drones, autonomous devices, central and distributed control based on data communications: the same technologies can be used on different platforms to different purposes. such as make a group of robots perform coordinated movements, or some drones to explore an area transmitting images, answering commands from a control console or acting on their own.

In all, results obtained confirm continuation of the experience, and these trends appear as the natural roads to transit.

VII. Conclusions

The use of Software Defined Radio in Education proved beneficial in several aspects: hands on experience, better understanding of essential functions by combination into identifiable applications, not only simulation but real world communications with all its difficulties, the re-creation in classroom of the same work environment students will find in industry. The SDR paradigm also proved to be an outstanding element of motivation. GR and GWN were the specific tools through which SDR was involved in our experience.

GR is a very active research project, with a high rate of new versioning, and consequently some deficiencies in documentation. For beginners, it presents some difficulties to extension through the creation of new blocks. However, its merits in Education greatly surpass these limitations. Its use in the labs for a course, in assignments to students, in research projects, soundly proved its value.

GWN extends GR into data communications, successfully shielding users from version change. Its structure and documentation make it accessible for advanced undergraduate students, who can also extend functionality by creating new blocks in a straightforward way. The addition of events, timing and finite state machines, places GWN as a valuable tool for

experiment and research in data communications protocols, specially in Education, but potentially also in industry.

All these tools are open and free; they can not only be obtained immediately and at no cost, but can also be explored in its internals, modified, extended, or applied to new developments with no limitations. This opened a universe of potential realizations never seen before, and within reach of even very small budgets. This is very good news for underdeveloped countries.

Through our experience, we verified SDR is a valuable tool for Engineering Education, not only for providing real world experience, but also because of its reach: it can be involved relatively early in undergraduate courses, and go through into graduate studies, research, and industry. In short, the SDR paradigm effectively bridges the gap from theory into practice.

Beyond other virtues, we greatly valued SDR as a motivational tool: experimenting SDR made students increasingly interested in theoretical subjects, something very difficult to achieve by itself. We perceived present day students were more easily engaged into theoretical studies when they started with some concrete problem, when some practical goal was proposed to them. The urgency to know the usefulness of theory, a common demand of students sometimes very difficult to answer, is here reverted: it is the practical challenge which leads to theory. As a consequence, several students confirmed their pursuing of graduate studies in the area, and were eager to go into early research training.

REFERENCES

[1] DTV ISDB-T in GNURadio (2018). URL https://github.com/git-artes/gr-isdbt. Accessed 19.02.2018

[2] ArchLinux: Arch Linux (2018). URL https://www.archlinux.org/. Accessed 19.02.2018

[3] Bianchi, G., Bonola, M., Pontarelli, S., Sanvito, D., Capone, A., Cascone, C.: Open Packet Processor: a programmable architecture for wire speed platform-independent stateful in-network processing (2016). URL http://arxiv.org/pdf/1605.01977v1.pdf. Accessed 06.07.2017

[4] Bilén, S., Wyglinski, A., Anderson, C., Cooklev, T., Dietrich, C., Farhang-Boroujeny, B., Urbina, J., Edwards, S., Reed, J.: Software-Defined Radio: a new paradigm for integrated curriculum delivery. IEEE Communications Magazine **52**(5) (2014)

[5] Bloessl, B., Leitner, C., Dressler, F., Sommer, C.: A GNU radio-based IEEE 802.15.4 testbed. 12. GI/ITG KuVS Fachgespräch Drahtlose Sensornetze (FGSN 2013) pp. 37–40 (2013). URL http://www.ccs-labs.org/bib/bloessl2013gnu/bloessl2013gnu.pdf. Accessed 06.07.2017

[6] Bonior, J.D., Corum, S., McNew, B., Piras, A., Witherspoon, B., Qiu, R.C., Guo, N., Hu, Z.: Using software-defined radio network testbed to enhance undergraduate education and encourage graduate level studies. In: 2012 Proceedings of IEEE Southeastcon, pp. 1–4 (2012). DOI 10.1109/SECon.2012.6196923

[7] Busheri, E., Ectors, M.: How Open Source is Shaping the Future of Wireless (2016). URL https://www.wirelessweek.com/article/2016/08/how-open-source-shaping-future-wireless. Accessed 06.07.2017

[8] El-Hajjar, M., Nguyen, Q., Maunder, R., Ng, S.: Demonstrating the practical challenges of wireless communications using USRP. IEEE Communications Magazine **52**(5) (2014)

[9] Ettus: Ettus Research, A National Instruments Company (2018). URL https://www.ettus.com/. Accessed 19.02.2018

[10] FutureMarketsInsights: Software Defined Radio (SDR) Market: Global Industry Analysis and Opportunity Assessment 2014 - 2020 (2016). URL http://www.futuremarketinsights.com/reports/software-defined-radio-market. Accessed 06.07.2017

[11] GNURadio: GNU Radio Manual and C++ API Reference (2016). URL http://gnuradio.org/doc/doxygen/. Accessed 19.02.2018

[12] GNURadio: GNU Radio (2018). URL http://gnuradio.org/. Accessed 19.02.2018

[13] GNURadio: Out-of-tree modules: Extending GNU Radio with own functionality and blocks. (2018). URL https://wiki.gnuradio.org/index.php/OutOfTreeModules. Accessed 19.02.2018

[14] GNURadio: Tutorials (2018). URL https://wiki.gnuradio.org/index.php/Tutorials. Accessed 19.02.2018

[15] Gonzalez-Barbone, V., Belzarena, P., Larroca, F., Randall, M., Romero, P.: Gwn: A framework for packet radio and medium access control in gnu radio. Wireless Innovation Forum Conference on Wireless Communications Technologies and Software Defined Radio (WInnComm 17) (2017)

[16] GWN: GWN, the GNU Wireless Network project, homepage (2018). URL https://github.com/vagonbar/gr-gwn/. Accessed 19.02.2018

[17] GWN: GWN, the GNU Wireless Network project wiki (2018). URL https://github.com/vagonbar/gr-gwn/wiki. Accessed 19.02.2018

[18] Hardkernel: Odroid-XU4 (2016). URL http://www.hardkernel.com/main/products/prdt_info.php?g_code=G143452239825. Accessed 06.07.2016

[19] IIE: Comunicaciones Inalámbricas (Wireless Communications), Instituto de Ingeniería Eléctrica (IIE), Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay (2017). URL https://eva.fing.edu.uy/course/view.php?id=493. Accessed 06.07.2017

[20] Larroca, F., Belzarena, P.: Comunicaciones inalámbricas, notas del curso (2017). URL https://iie.fing.edu.uy/investigacion/grupos/artes/es/investigacion/libro-comunicaciones-inalambricas/. Accessed 19.02.2018

[21] Larroca, F., Flores Guridi, P., Gomez Sena, G., Gonzalez-Barbone, V., Belzarena, P.: An Open and Free ISDB-T full_seg Receiver Implemented in GNU Radio. In: Proceedings of Wireless Innovation Conference on Wireless Communications Technologies and Software Defined Radio (WInnComm 2016), pp. 142–151. Reston, Virginia (2016)

[22] Luther, E., Dinolfo, J., Katti, S.: Software Defined Radio Provides New Opportunities for Hands-on RF Education. In: Proceedings 2012 Canadian Engineering Education Association (CEEA12) (2012)

[23] MathWorks: Simulink (2017). URL http://www.mathworks.com/products/simulink/. Accessed 06.07.2017

[24] Michelson, D.G., Matolak, D.W., Tong, W.: Communications education and training: software defined radio [Guest Editorial]. IEEE Communications Magazine **52**(5), 182–183 (2014)

[25] Nuand: bladeRF - the USB 3.0 Superspeed Software Defined Radio (2017). URL https://www.nuand.com/. Accessed 06.07.2017

[26] Nuñez Ortuño, J., Mascareñas Pérez-Iñigo, C.: Software Defined RAdio (SDR) on Radiocommunications Teaching. In: Proceedings of INTED2016, pp. 1094–1100 (2016)

[27] RaspberryPi: The Raspberry Pi Foundation, UK (2017). URL https://www.raspberrypi.org/. Accessed 06.07.2017

[28] Raspbian: Raspbian homesite (2018). URL https://www.raspbian.org/. Accessed 19.02.2018

[29] RTL-SDR.com: Buy RTL-SDR dongles (2017). URL http://www.rtl-sdr.com/buy-rtl-sdr-dvb-t-dongles/. Accessed 06.07.2017

[30] SparkFun-Electronics: HackRF One (2017). URL https://www.sparkfun.com/products/13001. Accessed 06.07.2017

[31] Tallerine: Tallerine: Taller de Introducción a la Ingeniería Eléctrica (2016). URL https://eva.fing.edu.uy/course/view.php?id=405. Accessed 19.02.2018

[32] TallerInTe: Tallerinte: Taller de Introducción a las Telecomunicaciones (2018). URL https://eva.fing.edu.uy/course/view.php?id=933. Accessed 19.02.2018

[33] Wyglinski, A.M., Orofino, D.P., Ettus, M.N., Rondeau, T.W.: Revolutionizing software defined radio: case studies in hardware, software, and education. IEEE Communications Magazine **54**(1) (2016)

[34] Wyglinski, A.M., Pu, D., Cullen, D.J.: Digital Communication Systems Education via Software-Defined Radio Experimentation. In: 118th ASEE Annual Conference and Exposition. Vancouver, BC, Canada (2011)

[35] Xubuntu: Xubuntu homesite (2018). URL http://xubuntu.org/. Accessed 19.02.2018

A RFID-based IoT Cybersecurity Lab in Telecommunications Engineering

Santiago Figueroa
Ceit-IK4
Donostia / San Sebastian, Spain
sfigueroa@ceit.es

Javier Añorga
Ceit-IK4, TECNUN
Donostia / San Sebastian, Spain
janorga@ceit.es

Josune Hernantes
TECNUN
Donostia / San Sebastian, Spain
jhernantes@tecnun.es

Juan Francisco Carías
TECNUN
Donostia / San Sebastian, Spain
jfcarias@tecnun.es

Saioa Arrizabalaga
Ceit-IK4, TECNUN
Donostia / San Sebastian, Spain
sarrizabalaga@ceit.es

***Abstract*— The Internet of Things (IoT) is a distributed system of physical objects that requires the integration of hardware (e.g., sensors, actuators) and network communications in order to collect and exchange data. IoT smart objects need to be identified in some way to determine the origin of the data. One of the best-positioned technologies to perform identification is RFID (Radio Frequency Identification), which has gained a lot of popularity in applications like access control, payment cards or logistics. This paper presents a RFID-based IoT Cybersecurity laboratory: it provides a guideline for understanding and analyzing in depth the RFID technology from the cybersecurity point of view. The application is based on Proxmark3, which is a suite of HW/SW tools that facilitates message eavesdropping and emulation of both tags and readers. All the software, firmware and hardware that is described here is open source and open design.**

Keywords— RFID, Cybersecurity, IoT, Internet of Things, Telecommunications Engineering

I. INTRODUCTION

This lab is part of the Smart Cities subject in the Master in Telecommunication Engineering at the University of Navarra's School of Engineering (TECNUN) in Donostia, San Sebastian (Spain). The same infrastructure is also part of the IoT Space, an open Internet of Things (IoT) laboratory environment that promotes training and innovation in young researchers (final undergraduate or Master's project), who work on real projects related to the concepts deployed by IoT, which also serves as an experimentation node with a focus on Industry 4.0 applications.

Smart Cities subject (which has 5 ECTS) is part of the Network, Systems and Services module (20 ECTS) of the Telecommunication Engineering plan study. The subject "Smart Cities" includes five sections: *I. Network and Sensors, II. Applications, Services and Protocols, QoS and IP Networks, IV. Security in Smart Cities and V. Visual Analytics.* RFID-based IoT Cybersecurity Lab, will be part of next 2018-2019 academic year as part of the section called *Security in Smart Cities.*

There are other similar initiatives that have previously been carried out also in Tecnun and Ceit-IK4, which are aligned with this new laboratory, such as [1] and [2]. In [1] a new tool for cybersecurity learning is presented; in [2], another PBL (Project-Based Learning) developed for the same subject is described, which is currently part of *Network and Sensors* section. IEEE 802.15.4 2.4GHz WSN standard is used to build a sensor IoT environment to measures parameters as temperature, humidity and light.

RFID-based IoT Cybersecurity Lab was created due to the practical experience based in PBL (Project-Based Learning) received by [2] that will be extended to Cybersecurity branch and will allow to apply innovative student learning methodologies to teach cybersecurity to Master students.

Our use of PBL is designed to improve the efficiency of cybersecurity education and to help students develop the wide range of skills needed to be a cybersecurity professional, including technical aspects, team work, making judgments and developing as lifelong learners.

Rationale for using PBL in Cybersecurity are:

- Reduce 'information overload' and stop students from learning huge amounts of unnecessary theoretical detail.
- Address perceived weakness in traditional 'didactic' teaching methods.
- Improve students' control over their learning by providing more opportunity to be self-directed, to locate what they need to know and give them possession of their learning.
- Improve students' interpersonal skills.

This paper provides a detailed guideline for going through the security analysis of RFID (Radio Frequency Identification) technology based on a PBL methodology, through the cryptographic analysis to RFID Tags, used in popular applications like control access, payment cards and logistics. Although the present work is focused on the labels Mifare Classic (MFCT), it must be taken into account that similar analysis are carried out for cards such as Mifare Ultralight, EM4100, T5577, HID Prox Card II, to name some of the most popular cards in the market.

The overall goal is to improve student learning via a multidisciplinary approach which encourages students to

collaborate with their peers, ask questions, develop a deeper understanding of the subject and take actions in solving real-world challenges. Also, students establish essential questions which reflect their interests in information security, formulate challenges on how to safeguard confidential information from cyber-attacks and then came up with solutions to secure their information and network. The pentesting approach through the exploitation of different vulnerabilities is another focus of this Lab.

This paper is structured as follows. Section II shows the objective pursued. Section III describes the material used in the practice lab. Section IV introduces the necessary steps to configure Lab devices, while section V describe how is integrated this devices and applications. Section VI describes the process of capturing and analyzing RFID communications with the Wireshark software tool. Section VII depicts how to use the Proxmark3 security tool in reader mode, whereas section VIII shows how to use the same tool in eavesdropping mode. Section IX details a cryptographic analysis of a Mifare Classic Card and Section X the Proxmark3 as a cryptographic analysis tool. Finally, Section XI provides some conclusions regarding the competences that students should have acquired after finishing this lab.

II. OBJECTIVES

The objective of this paper is to provide a practical introduction to RFID security analysis using the radio frequency identification tool Proxmark3. The outcome of the proposed practice lab is a guide that offers the following information:

- Description of the material to be used in the lab.
- Introduction to the tools with the necessary steps for getting started.
- Practical exercise in connecting a tag with a RFID reader.
- How to use Proxmark3 as a reading, eavesdropping and cryptographic analysis tool.

III. MATERIAL

The material needed to perform the proposed lab includes the following hardware: Proxmark3, a Raspberry Pi 3B, a High Frequency (HF) Reader and RFID Tag. The required software includes: the Proxmark3 client, Minicom (text-based serial port communications program), and Wireshark (network analyzer)[1].

A. *Proxmark3*

Proxmark3[2,3] (PM3) supports both low (125 kHz-134 kHz) and high frequency (13.56MHz) signal processing, which is enabled by two independent parallel antenna circuits. Both antennas are connected to a 4-pin Hirose connector, and in turn it is connected to an external loop antenna [3]. PM3 can be used in reading mode, eavesdropping mode or in card emulation mode. The reading and eavesdropping mode will be analyzed throughout this paper.

The signal from the antenna is routed through the FPGA (Field Programmable Gate Array) after it has been digitized by an 8-bit ADC (Analog-to-Digital Converter). The FPGA relays the information needed to perform the signal decoding to the microcontroller. The core of this microcontroller is an ARM processor that is in charge of the protocol. It receives the digital signal from the FPGA and decodes it. The decoded signal can just be copied to a buffer in the EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory).

The PM3 has an USB interface to the computer. The current implementation uses the default Human Interface Device (HID) USB protocol. The microcontroller and the FPGA can be flashed via USB [3].

B. *RaspberryPi3B*

Another important piece of hardware in the Lab is the RaspberryPi3B4 (RBPI3), which is a small single-board computer. The RBPI3 has a Broadcom System on chip, including a 64-bit processor with four ARM Cortex cores running at 1.2 MHz, four USB 2.0, an Ethernet port, and BLE (Bluetooth Low Energy) and Wi-Fi interfaces, among other powerful features [4].

The RBPI3 has been selected as part of the Lab's hardware to compile the PM3 client due to its portability and easy remote access using SSH (Secure Shell) or VNC (Virtual Network Computing).

C. *HF Reader ISO 14443*

A RFID reader is required in order to get captures in Wireshark and to use the PM3 in eavesdropping mode. The NXP MFRC500 RFID reader has been selected due to its easy management via UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) communication.

D. *Tag*

MFCT has been selected for a reference analysis. This is an EEPROM memory chip which implements a proprietary secure communication algorithm (CRYPTO1).

MFCT's basic operations are: read, write, increment, and decrement. The memory of the tag is divided into 16 sectors. Each sector is further divided into 4 blocks of 16 bytes each. The last block of each sector is called the sector trailer and stores two secret keys ('A' and 'B' keys) and access conditions corresponding to that sector.

To perform an operation on a block, the reader (MFRC500) must be authenticated with the sector containing that block. The access conditions of that sector determine which key, 'A' or 'B', must be used during the authentication stage. More information about MFCT can be found in [5].

E. *Minicom and HF Reader commands*

A Minicom is a text-based serial port communications program. It is used to talk to external RS-232 devices such as

[1] https://www.wireshark.org
[2] https://proxmark3.com
[3] https://proxmark3.com

mobile phones, routers, and serial console ports. Minicom is installed on the RBPI3 Operating System (Raspbian). With Minicom, the user can exchange commands with the HF Reader. Table 1 shows the commands used in this Lab [6].

TABLE 1 MFRC500 COMMON COMMANDS

Common commands	
Command	***Description***
'c'	Continuous read
's'	Select
'l'	Login
'rb'	Read Block
'wb'	Write Block

F. PM3 app and Wireshark

Both the PM3 client and Wireshark are covered in Section IV in terms of installation and configuration.

IV. CONFIGURING LAB DEVICES

This section contains concise and clear instructions for setting up the working environment and a description of the designed lab architecture.

A. Installing and configuring the RBPI3

First, it is necessary that the Raspbian OS is installed on the RBPI3. To do this, Raspbian must be downloaded, and Noobs[4] is used as the booting system. Then, using Etcher[5], the SD Card with OS Raspbian on it can be flashed. By default, the username is 'pi' and the password is 'raspberry'.

To detect the RBPI3 architecture installed, use the following command (C: Command, R: Console Output), and the response below it should be obtained:

```
C: $ sudo uname –a                    (1)
R: Linux raspberrypi 4.4.50-v7+
```

In addition, SSH and VNC can be enabled for remote access the RBPI3. To activate SSH and VNC servers, use the following command as root user:

```
C: $ sudo raspi-config                (2)
```

and set the services in the Interfacing Options.

Once the server is activated, in the case of SSH, it can be accessed by using the following command:

```
C: $ ssh pi@192.168.2.116             (3)
```

from a client terminal, where "192.168.2.116" is the RBPI3 IPv4 address. The VNC client needs a graphical version like Real VNC[6].

[4] Noobs Documentation: https://goo.gl/pk3AOK
[5] https://etcher.io
[6] https://www.realvnc.com

B. Installing and configuring Minicom serial interface

Install the program as root user with:

```
C: $ sudo apt-get install minicom     (4)
```

In order to find the name of the HF Reader, the next command must be typed into the terminal:

```
C: $ dmesg | grep tty                 (5)
```

The output should be similar to:

```
R: [266.973239] usb 1-1.2: FTDI USB Serial Device converter now attached to ttyUSB0
```

In the output shown above, the serial port is ttyUSB0. This port name will be used in Minicom. Next, the following command must be entered in a terminal as root user:

```
C: $ sudo minicom –s                  (6)
```

Next, choose '`Serial port setup`', and then adjust the Serial Device to the corresponding setting parameters, for example:

```
C: A - Serial Device : /dev/ttyS0     (7)
C: E - Bps/Par/Bits : 9600 8N1
C: F – Hardware Flow Control : No
C: G – Software Flow Control : Yes
```

C. Installing and configuring PM3 on RBPI3

To install and configure PM3, each step recommended in [7] must be followed. When the process is finished, this positive response should be obtained:

```
C: $ sudo ./proxmark3 /dev/ttyACM0    (8)
C: proxmark3> hw version              (9)
C: proxmark3> hw tune                 (10)
```

Command 8 allows running PM3 application using PM3 hardware connected across `/dev/ttyACM0`. Command 9 allows knowing PM3 firmware version installed and command 10 allows identifying antenna type installed.

It has been shown that it is possible to set up PM3 on RBPI3 running Raspbian OS, since Raspbian is a Debian-based OS distribution and has a Linux Kernel (4.4.50-v7+) similar to Ubuntu 16.04.

D. Installing and configuring Wireshark

The Wireshark installation is simple. In a RBPI3 terminal use the following command as root:

```
C: $ sudo apt-get install wireshark   (11)
```

next, the command:

```
C: $ sudo modprobe usbmon             (12)
```

enables the module that allows traffic to be captured via USB. Finally, the command:

```
C: $ sudo chmod +x /sys/kernel/debug/usb/usbmon/1t   (13)
```

grants execution permission to USB device.

In addition, the command

```
C: $ lsusb                                    (14)
```

is needed to know the device number and the bus used. The following response should show up when an HF Reader is connected:

```
R: Bus 001 Device 007: ID 0403:6015 Future Technology Devices International, Ltd Bridge (I2C/SPI/UART/FIFO)
```

Then, it is necessary to open Wireshark as root with the command:

```
C: $ sudo wireshark                           (15)
```

V. LAB ARCHITECTURE

Once the materials and the installation for each device have been described, it is important to define the three different configurations that are used in the lab.

The Fig. 1 shows the first configuration used that will be described in the section VI. Similarly, Fig. 2 and Fig. 3 will be described in Section VII and VIII respectively. Each student will have a workstation with devices and open source software. The lab guide indicates which configuration needs to be used thorough the exercises.

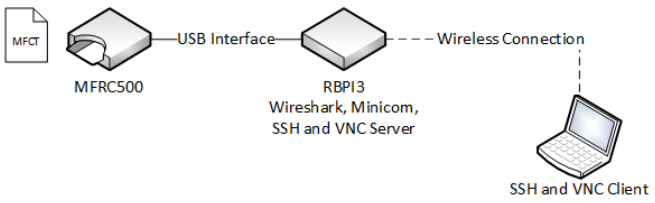


Fig. 1 Capture and analysis with Wireshark mode

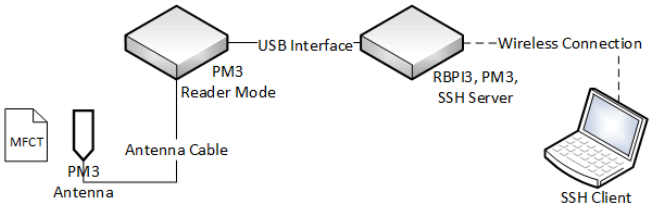


Fig. 2 PM3 in reading mode

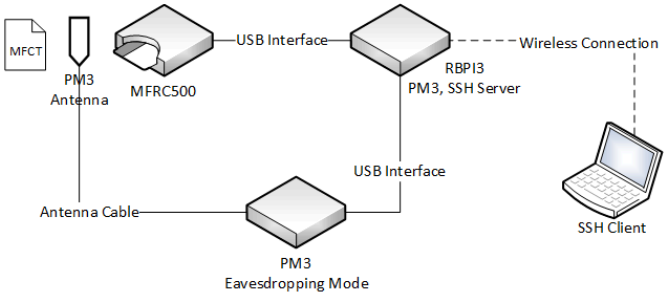


Fig. 3 PM3 in eavesdropping mode

VI. CAPTURING AND ANALYZING WITH WIRESHARK

To perform a security analysis of RFID cards, it is necessary to control the interaction between the reader and the card at low level. For this reason, the following test generates traffic and then performs some captures, so that the interaction can be analyzed and understood.

First, with Wireshark opened and usbmon1 selected, apply the filter `usb.device_address == 7`, which corresponds to the USB device ID for the detected HF Reader. Next, Minicom must be activated so it is possible to have the following captures, as Fig. 4 shows.



Fig. 4 Wireshark capture

Second, in a controlled environment, knowing Mifare Tag parameters like UID and Sector 0 Key A, hold the Mifare Tag to the HF Reader and use the follow commands on Minicom:

TABLE 2 MFRC500 COMMANDS USING MINICOM INTERFACE

Commands Applying	
Command	***Description***
's'	Select the card
'l00AAFFFFFFFFFFF'	Login in sector 0
'rb00'	Read Block 0
'rb01'	Read Block 1
'rb02'	Read Block 2

Now, the Wireshark filter `usb.device_address == 54 & frame.len > 66` must be used to capture a specific data package and leave a control package. Fig. 5 shows the captures before a login process. Fig. 6 and Fig. 7 show the captures after a login process and reading the content of a block.

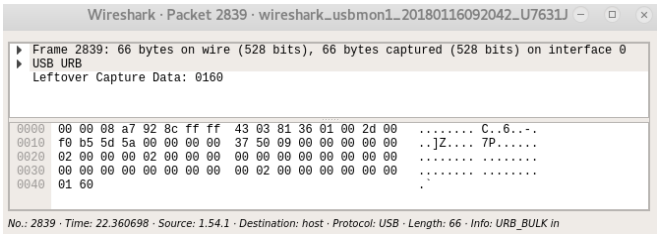


Fig. 5 Wireshark capture before login

In both cases the information which is shown by Wireshark captures do not depict the needed low level information to carry out a security analysis. As Fig. 6 shows, the command

that is sent (`rb00` (Table 2)) is captured, but no more information about the protocol is obtained. For this reason, it is necessary to use PM3.

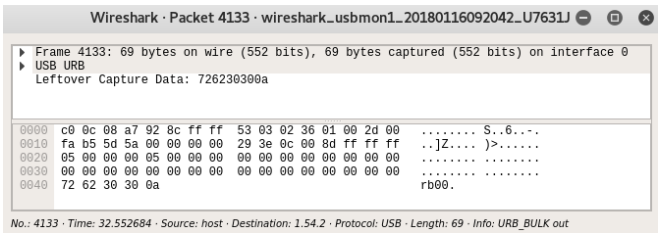


Fig. 6 Wireshark capture after login in block 00 (Part I)

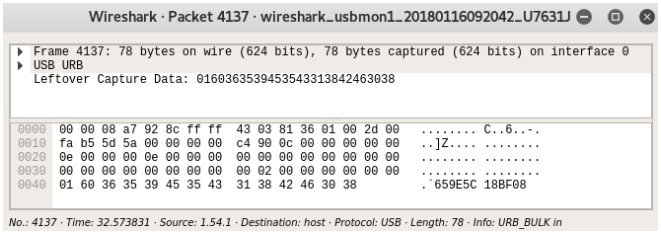


Fig. 7 Wireshark capture after login in block 00 (Part II)

VII. PM3 IN READER MODE

When configured in reader mode, as Fig. 2 shows, PM3 emulates an RFID reader, like MFRC500. The major difference with a real reader is that it allows the execution of commands to know the first interaction between the tag and the reader.

To use the PM3 in Reader mode, a controlled environment is necessary (Fig. 2). Then, the following command can be applied:

```
C: proxmark3> hf search                    (16)
R: UID : 65 9e 5c 18
   ATQA : 00 04
   SAK : 08 [2]
   TYPE : NXP MIFARE CLASSIC 1k | Plus 2k SL1 proprietary non iso14443-4 card found, RATS not supported. No chinese magic backdoor command detected
   Prng detection: WEAK
   Valid ISO14443A Tag Found - Quiting Search
```

Command 16 searches for HF Tag (13.56 MHz), nearby the PM3.

The response provides critical information about the tag (card). For example, the UID Card, [5] in this case, and the low level command exchanged between reader (PM3) and tag, which corresponds to ISO 14443-3 [8].

To study this protocol in depth, execute:

```
C: proxmark3> hf 14a reader                (17)
R: UID : 65 9e 5c 18
   ATQA : 00 04
   SAK : 08 [2]
   Field dropped
```

Command 17 allows acting like an ISO14443 Type A reader.

Details about ISO 14443-3, such as reader pulling, card detection and anti-collision algorithms, are described in [9], [10], [11].

VIII. PM3 IN EAVESDROPPING MODE

While the PM3 Reader Mode allows the study of RFID Cards, the Eavesdropping Mode allows a focus on security aspects, because as shown in Fig. 3, the PM3 antenna receives interaction MFCT – MFRC500.

The following command starts an eavesdropping:

```
C: proxmark3> hf 14a snoop                 (18)
```

Command 18 allows eavesdropping ISO 14443 Type A card.

The interaction that happens in an ISO/IEC 14443 type A communication is described in [12].

It is necessary to hold the PM3 antenna next to the reader and present the MFCT. Blinking lights indicate that the transmission has been captured. If the button on the PM3 is pressed, the flow frames stops. Another way is to wait until the buffer is full. The trace most likely contains more than only the authentication information. Before the reader can exchange messages with a MFCT, it needs to perform the initial communication and the anti-collision protocol [8]. To retrieve the eavesdropped trace from the PM3, the following command 19 can be used:

```
C: proxmark3> hf list 14a                  (19)
```

Fig. 8 represents an example of capture in eavesdropping mode. In this case, a deep interaction between MFCT and MFRC500 is detected. Fig. 9 explains this interaction.

```
proxmark3> hf list 14a
Waiting for a response from the proxmark...
#db# COMMAND FINISHED
#db# maxDataLen=4, Uart.state=0, Uart.len=0
#db# traceLen=815, Uart.output[0]=00000093
Recorded Activity (TraceLen = 815 bytes)
Start = Start of Start Bit, End = End of last modulation. Src = Source of Transfer
iso14443a - All times are in carrier periods (1/13.56Mhz)
iClass    - Timings are not as accurate
      Start |        End | Src | Data (! denotes parity error)      | CRC | Annotation |
------------+------------+-----+------------------------------------+-----+------------|
          0 |   22359968 | Rdr | 26                                 |     | REQA       |
    3725888 |   22363524 | Tag | 04  00                             |     |            |
    7453184 |   22369184 | Rdr | 93  20                             |     | ANTICOLL   |
   11179456 |   22376196 | Tag | 3e  b4  e2  49  21                 |     |            |
   14905408 |   22583136 | Rdr | 93  70  3e  b4  e2  49  21  69  62 |  ok | SELECT_UID |
   18632224 |   22587828 | Tag | 08  b6  dd                         |     |            |
   18634452 |   22610640 | Rdr | 60  02  e7  58                     |  ok | AUTH-A(2)  |
   22358912 |   22620084 | Tag | 24  5c  db  ee                     |     |            |
   22361156 |   22630816 | Rdr |58! 47!  67 bf!  68  6f 4f! b9!     | !crc| ?          |
   22366720 |   22636724 | Tag |60! 21! b9! 3d!                     |     |            |
```

Fig. 8 Eavesdropping mode capture

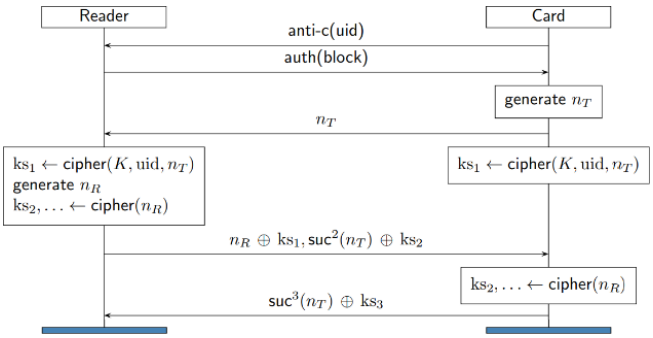


Fig. 9 Interaction between MFCT and MFCR500

The capture will be used in the next section to perform a deep cryptography analysis, which is important for recovering certain information: `uid: 3eb4e249`, `nt: 245cdbee`, `{nr}: 584767bf`, `{ar}: 686f4fb9`, `{at}: 6021b93d`; where:

`uid: Identification number`

`nt: nonce tag`

`nr: nonce reader`

`at: answer tag`

`ar: answer reader`

`{nr}: nonce reader cipher`

`{at}: answer tag cipher`

`{ar}: answer reader cipher`

`suc: successor`

This process is known as "Three pass authentication", which is described by [13] and mentioned below:

- The tag picks a challenge nonce 'nt' and sends it to the reader in the clear.
- The reader sends its own challenge nonce 'nr' together with the answer 'ar' to the tag's challenge.
- The tag finishes authentication by replying at to the challenge of the reader.

The two next sections propose a methodology to develop a cryptography analysis, including a pseudocode and the implementation with PM3.

IX. Cryptography Analysis

The Authentication Protocol is the starting point for the exchange of the ciphered information. This section will analyze the three-pass authentication step by step.

A. Pseudo Random Number Generator (PRNG) analysis side Tag

First, once selected the card and exchanged the '`uid`' with the reader, the tag sends '`nt`' (`245CDBEE` in Fig. 8). The '`nt`' is generated by PRNG as shown in Fig. 10.

According to [14], the random numbers are generated by a linear feedback shift register. The register is 32 bits long, as '`nt`' and the feedback only use the 16 lower bits, having 2^{16}-1 combinations:



Fig. 10 PRNG scheme

The clock speed and initialization are other important parameters mentioned [14]. In this way, in each oscillation of the clock a new 32-bit number will be generated in the PNRG and therefore a nonce successor e.g: 'suc_2(nt)', 'suc_3(nt)', ..., as shown Fig. 9.

According to [15], PRNG is initialized at 0xAAAA and clocked every 128 oscillations of the carrier frequency. A frequency of f_{PRNG} = 106 Hz is given, and the whole search space will repeat every `T=0,618619s`.

Next, a PRNG implementation described by pseudocode enables the sucesor nonce to be calculated, along with the distance between two nonces:

```
01. Load SrcNonce
02. Load TargNonce
03. Distance = 0
04. Rand = SrcNonce
05: Reverse bits in each byte of Rand
06: Reverse in each byte of TargNonce
07: WHILE Rand != Targnonce
   08: Shift Rand left by 1 bit
   09: bit15 XOR bit13 XOR bit12 XOR bit10 of
Rand
   10: Rand = result of (09) OR Rand
   11: Increment Distance by 1
      12: IF Distance > 2^16
      13: THEN
      14: Distance = 0;
15. Exit Loop
16. END IF
18. END WHILE
```

In the next section a PM3 tool with a similar implementation is used to obtain 'suc^2(nt)' and 'suc^3(nt)'.

B. CRYPTO1 cipher and PRNG analysis reader side

Second, as shown in Fig. 11, when the reader receives the '`nt`' the cipher system is activated, which allows to generate '`ks1`' to obtain '`{nr}`' and to generate '`ks2`' to obtain '`{ar}`'; on the tag side, '`ks3`' is generated to obtain '`{at}`'. Then, it will be used to get '`ks4`', '`ks5`', and so on, thus encrypting the plain text. Both, tag and reader clock are synchronized.

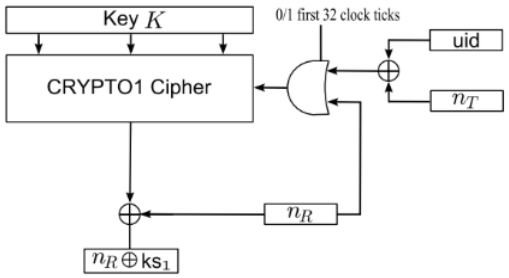


Fig. 11 Initialization diagram

The system provides mutual authentication and data secrecy by means of the so called CRYPTO1 cipher [16].

A CRYPTO1 is a fast cipher based on a 48-bit Linear Feedback Shift Register (LFSR) from which 20 bits are entered into a Boolean equation filter to obtain a bit of keystream. To obtain the next keystream bit, the LFSR is shifted left and filtered.

At every clock tick, the register is shifted one bit to the left. The LFSR has an input bit that is XOR-ed with the feedback bit and then fed into the LFSR to the right.

According to [17], the keystream generated in the first 32 clock ticks is ignored, as shown in Fig. 12, and therefore it is not used to cypher plaintext. This keystream only uses '`K`' (secret key of a sector) and the '`XOR`' between '`nt`' and '`uid`' as feedback bits.

`XOR Representation: nt ⊕ uid ⊕ K`

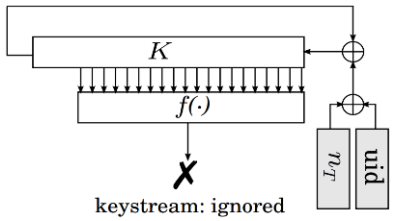


Fig. 12 First 32 clock ticks

Next, the keystream (**'ks1'**) is generated in the second 32 clock (64 clock ticks) ticks and is used to cypher the **'nr'** that PRNG generated (Fig. 13). In this case, **'{nr}'** is obtained. This keystream uses:

`XOR Representation: nt ⊕ (uid ⊕ nt) ⊕ K ⊕ 'feedback bits'`

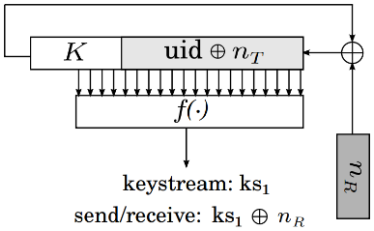


Fig. 13 Second 32 clock ticks

Before the reader can send the response to '`nt`' it is necessary to generate '`ks2`'. Fig. 14 shows the process:

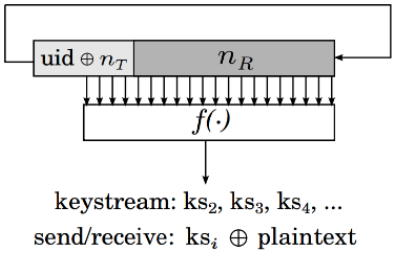


Fig. 14 Runnig mode

For each new '`ks`', a new '`nr`' is generated by the PRNG and used.

`nr ⊕ ks1 = {nr}`

`ar = suc²(nt)`

`suc² (nt) ⊕ ks2 = {ar}`

`nonce and answer reader ciphered: {nr}{ar}`

In Fig. 8, the reader message was `58!47!67BF!686F4F!B9!`, divided in:

`{nr}:58!47!67BF!`

`{ar}:686F4F!B9!`

At this point, the tag is able to update the cipher state in the same way and verify the authenticity of the reader. The remainder of the keystream 'ks3', 'ks4' . . . is now determined and from now on all communication is encrypted, i.e., XOR-ed with the keystream.

C. CRYPTO1 Cipher and PRNG analysis Tag side

The Tag side has the same cryptographic system as shown in Fig. 11. Synchronization between clocks will allow the tag (once the reader's message (`{nr}{ar}`) is received) generating the answer tag cipher:

`at = suc³(nt)`

`suc³(nt) ⊕ ks3 = {at}`

The keystream 'ks3' is generated with the process shown in Fig. 14.

X. CRYPTOGRAPHY ANALYSIS USING PM3

PM3 includes an important tool that allows the nonce and the keystream to be calculated. Then, using the same values as it is given in Fig. 8, the command and the response are shown.

```
C: /mfkey> sudo ./mfkey64 3eb4e249 245cdbee
584767bf 686f4fb9 6021b93d                    (20)
```

Recovering key for:

`R: uid: 3eb4e249`

`nt: 245cdbee`

```
{nr}: 584767bf
{ar}: 686f4fb9
{at}: 6021b93d
LFSR successors of the tag challenge:
ar: b095c7be
at: 5843ff81
Time spent in lfsr_recovery64(): 0.12 seconds
Keystream used to generate {ar} and {at}:
ks2: d8fa8807
ks3: 386246bc
```

Although '`ks2`' and '`ks3`' are used to obtain the values of '`{ar}`' and '`{at}`' respectively, the following process is done to prove that the values of '`ks2`' and '`ks3`' recovered by the PM3 are the correct ones.

$$\begin{aligned} suc^2(nt) \oplus ks2 &= 0x686f4fb9 \\ \underline{suc^2(nt) \quad\quad = 0xb095c7be \oplus} \\ ks2 \quad\quad\quad\quad &= 0xd8fa8807 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} suc^3(nt) \oplus ks3 &= 0x6021b93d \\ \underline{suc^3(nt) \quad\quad = 0x5843ff81 \oplus} \\ ks3 \quad\quad\quad\quad &= 0x386246bc \end{aligned}$$

Fig. 15 shows how ks2 and ks3 have been calculated respectively through the XOR operation.

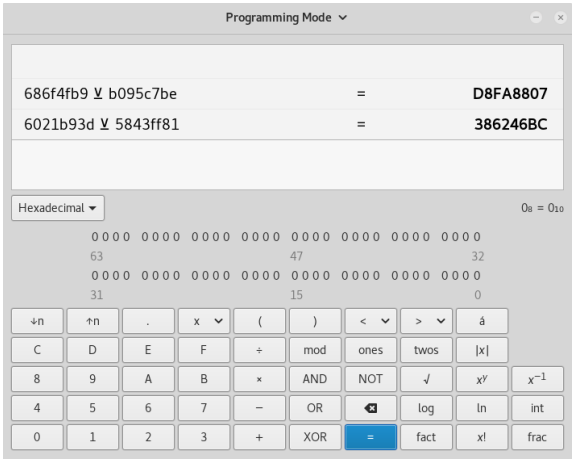


Fig. 15 Xor testing

XI. Conclusions

The Smart Cities subject within the Networks, Systems and Services module in the Master's in Telecommunications Engineering at Tecnun (University of Navarra) and the IoT Space aims to provide the students with a deep understanding of what Smart Cities are and competences they will need. As part of the skills needed to develop services and applications for Smart Cities, RFID Cybersecurity has been found to be essential. This paper has provided a guide for students that uses the PBL methodology. After following the instructions and completing the guide, students should be able to perform an in-depth cybersecurity analysis of the RFID technology, using a powerful tool like Proxmark3 and other relevant tools like Wireshark, Minicom and Raspberry Pi. Currently more PBL labs are being developed in order to develop skills related to other RFID technologies as well Bluetooth Low Energy (BLE), Zigbee and Wireless Hart technologies, all of which are inherent to any Smart Cities application.

References

[1] S. Alonso-Arce, Maykel; Añorga, Javier; Arrizabalaga, "Cybersecurity Challenge Learning Tool (CCLT): A new way to learn Cybersecurity," *III Jornadas Nac. Investig. en Ciberseguridad*, pp. 166–167, 2017.

[2] M. Alonso-Arce, J. Añorga, S. Arrizabalaga, and P. Bustamante, "A wireless sensor network PBL lab for the master in telecommunications engineering," *Proc. 2016 Technol. Appl. to Electron. Teaching, TAEE 2016*, 2016.

[3] F. D. Garcia, G. D. K. Gans, and R. Verdult, "Tutorial : Proxmark , the Swiss Army Knife for RFID Security Research," pp. 1–9, 2012.

[4] E. H. M. Les Pounder, Mayank Sharma, Jonni Bidwell, Neil Mohr, Neil Bothwick, *The Ultimate RaspberyPi Handbook*. Future, 2016.

[5] B. V Nxp, "MF1S70YYX_V1: MIFARE Classic EV1 4K - Mainstream contactless smart card IC for fast and easy solution development," no. November, pp. 1–37, 2017.

[6] U. Manual, "HF MIFARE Easy Module," *Middle East*, vol. 43, no. 0, pp. 1–63, 2008.

[7] Iceman, "Kali Linux," 2017. [Online]. Available: https://github.com/Proxmark/proxmark3/wiki/Ubuntu Linux.

[8] "ISO/IEC 14443-3:2011," 2016. [Online]. Available: https://www.iso.org/standard/50942.html.

[9] R. J. Rodríguez and V. Pepe, "On Relaying NFC Payment Transactions using Android device," in */Rooted*, 2015.

[10] J. Vila and R. J. Rodríguez, "Experiences on NFC Relay Attacks with Android: Virtual Pickpocketing Revisited," in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2015, vol. 9440, pp. 87–103.

[11] R. J. Rodríguez and V. Pepe, "Practical Experiences on NFC Relay Attacks with Android: Virtual Pickpocketing Revisited," 2015.

[12] T. Instruments, "ISO/IEC 14443 Overview," 2014.

[13] ISO, "INTERNATIONAL STANDARD ISO/IEC 9798-2," vol. 1999, 1999.

[14] K. Nohl and D. Evans, "Reverse-Engineering a Cryptographic RFID Tag," *Science (80-.).*, no. July, pp. 185–193, 2008.

[15] K. E. Penri-Williams, *Implementing an RFID MIFARE CLASSIC Attack*. 2009.

[16] F. D. Garcia *et al.*, "Dismantling MIFARE classic," in *European Symposium on Research in Computer Security*, 2008, pp. 97–114.

[17] G. de K. Gans, "Outsmarting Smart Cards," Radboud Universiteit Nijmegen, 2013.

SESIÓN II.B: ELECTRÓNICA ANALÓGICA 2

Uso del Internet de las Cosas como estrategia de aprendizaje en asignaturas de Electrónica

M. Perales Esteve, F. Barrero García, S. Toral Marín
Dept. Ingeniería Electrónica.
Escuela Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla
mperales@us.es

Abstract— **Es fácil constatar el creciente desinterés de los alumnos de ingeniería por la electrónica. La novedad que para la generación anterior supuso la electrónica ha pasado y es fácil presumir su dificultad para *engancharse* a las asignaturas de electrónica analógica y digital. Por el contrario, el concepto de *Internet de las Cosas* resulta, por cercanía y novedad, muy atractivo para los alumnos, permitiéndoles controlar circuitos electrónicos básicos desde un navegador web estándar, fijo o móvil, siendo por ello una útil herramienta para reactivar el interés de los alumnos por los circuitos y sistemas electrónicos. En este trabajo se presenta una manera sencilla de introducir el concepto del Internet de las Cosas en una asignatura optativa de electrónica.**

Keywords— ***Electrónica digital, ESP8266, Internet de las Cosas (Internet of Things).***

I. INTRODUCCIÓN

Indudablemente, el concepto de Internet de las Cosas (Internet of Things, IoT por sus siglas en inglés) [1] es un factor motivante para los alumnos, al ser un concepto relativamente novedoso y que les resulta atractivo por muchas causas, como puede ser la posibilidad de control o monitorización de variables físicas remotamente, desde el móvil o cualquier dispositivo conectado. Su uso en la enseñanza está justificado, sobre todo como factor de enganche de los estudiantes a la materia [2][3].

En este trabajo se muestra la implementación sencilla que se puede realizar del Internet de las cosas o Internet of Things (IoT)[1] en una asignatura optativa (Electrónica de Consumo) que se oferta a estudiantes de distintas titulaciones (Grados de Ingeniería en Tecnologías Industriales, en Tecnologías de las Telecomunicaciones y en Organización Industrial). Dichos alumnos tienen formación previa muy diversa, y es necesario adaptar las prácticas a esta realidad. Es importante, sobre todo, despertar el interés de los alumnos por la electrónica, más que realizar un desarrollo consistente de una aplicación completa. Por tanto, se hará un uso muy instrumental de la conexión inalámbrica y de los protocolos de red, sin entrar a valorar mejores opciones. Se trata, fundamentalmente, de hacer las clásicas prácticas de electrónica con microcontroladores (leer variables analógicas o digitales y actuar sobre periféricos digitales o pines de entrada/ salida), pero usando un microcontrolador que pueda conectarse a internet de manera sencilla y mostrar los resultados del proceso en una página web. La experiencia se puede extrapolar a otras asignaturas básicas de sistemas digitales, así como servir de puente hacia un desarrollo más electrónico de asignaturas centradas en las redes o en los protocolos de internet.

En el presente trabajo se definirá el contexto docente en el que se desarrollará la experiencia. Tras esto, se plantearán los objetivos de la misma, fijando qué se quiere lograr y dónde poner el acento. Posteriormente se expondrán las diferentes herramientas hardware y software disponibles, se justificará la elección de una concreta para la experiencia, y se mostrarán a continuación las diferentes prácticas que se pueden realizar con la misma. Finalmente, se presentarán algunas conclusiones preliminares de la experiencia, que fue puesta en marcha el curso pasado.

II. CONTEXTO DOCENTE

La asignatura de Electrónica de Consumo es una optativa de centro, lo que significa que se oferta como optativa a alumnos de varias titulaciones del centro. En concreto, actualmente se oferta a alumnos de los grados de Ingeniería de las Tecnologías Industriales, de Ingeniería en Tecnologías de las Telecomunicaciones, de Ingeniería en Organización Industrial y de Ingeniería Aeroespacial. Se sitúa en el segundo cuatrimestre de cuarto curso, al final de la vida académica de los alumnos. El hecho de tener alumnos de distintas titulaciones de procedencia provoca una gran dispersión en los conocimientos previos y, sobre todo, en el interés que la electrónica despierta en los alumnos. Hay que contar con que un cierto porcentaje de ellos se matriculan de esta asignatura simplemente porque no tiene *exámenes*, sino que se evalúa normalmente a través de la realización de trabajos.

Al ser una asignatura optativa, no está sujeta a cubrir ninguna competencia específica de los alumnos, teniendo bastante libertad a la hora de diseñar el proyecto docente de la misma. En los años que se lleva cursando, de hecho, ha ido cambiando su temario adecuándose al perfil de los alumnos y a los cambios tecnológicos que se han ido produciendo. Actualmente, la asignatura tiene tres bloques diferenciados, para cubrir aspectos diferentes de la materia:

- Electrónica analógica de audio. Se estudian circuitos de audio analógicos de uso en electrónica de consumo (amplificadores, previos, altavoces, sistemas de medida...)

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

- Instrumentación y normativas de electrónica de consumo. Se estudian circuitos de instrumentación electrónica de uso común y normativas a cumplir para dispositivos de electrónica de consumo.
- Electrónica digital de consumo. Se estudian elementos y sistemas digitales típicos de la electrónica de consumo (pantallas táctiles, sistemas bluetooth, dispositivos IoT, Sistemas embebidos...)

Es en esta tercera parte en la que se ha implementado la experiencia de introducir el concepto de IoT como factor de creación de interés en el alumnado. Hay que tener en cuenta que se trata de un tercio de la asignatura (más bien dos quintos, atendiendo al número de horas de la misma).

Por último, otra variable que se debe tener en cuenta, a la hora de diseñar unas prácticas o una actividad docente para esta asignatura es la variabilidad en el número de matriculados, que ha oscilado entre 10 y 30 en anteriores años. Esto lleva a que resulte difícil hacer acopio de material para la misma, siendo complicado conocer de antemano cuántas placas o cuántos sensores se van a necesitar. Como consecuencia, resulta conveniente diseñar actividades docentes flexibles y, sobre todo, económicas.

III. Objetivos perseguidos con la experiencia

El principal objetivo, como se ha comentado ya anteriormente, es despertar el interés de los alumnos por los sistemas electrónicos digitales, usando como *cebo* la conexión de los mismos a internet para el control y visualización de los sistemas a través de una página web, por ejemplo. Como resultado, el alumno debe ser capaz de realizar el control de un periférico del sistema microcontrolador (un pin de E/S, un pwm, o cualquier otro periférico) de manera remota desde una interfaz web, y de la misma manera debe poder representar en dicha interfaz algún valor interno del sistema microcontrolador. No se plantean otras cuestiones de vital importancia a la hora del diseño de sistemas de consumo IoT como pueden ser la seguridad de la comunicación, la encriptación de los datos, el control de accesos, contraseñas, etc. Todo esto se obvia, de manera intencionada, para centrar el foco en la implementación electrónica del sistema.

Para poder lograrlo, se necesitará disponer de una serie de elementos que faciliten el desarrollo del mismo:

- Disponer de un sistema microcontrolador de bajo coste, con conexión a internet, preferiblemente inalámbrica, que tenga accesibles entradas analógicas, entradas y salidas digitales y periféricos clásicos (uart, spi, i2c, pwm...)
- Entorno de programación asequible y de fácil instalación, con idea de que los alumnos puedan trabajar de forma autónoma
- Base de conocimientos accesible, con ejemplos de manejo del sistema y con plantillas para la creación de páginas web o manejo de protocolos estándar de comunicaciones.

En función del objetivo principal que se quiere conseguir, y teniendo en cuenta los medios necesarios para ello, se pueden definir de manera sucinta una serie de objetivos secundarios, que se han ido estableciendo a lo largo del desarrollo:

- Elegir una plataforma hardware con suficiente trayectoria pero que no esté obsoleta.
- Elegir un entorno de programación sencillo de arrancar, y que resulte adecuado a alumnos de cuarto curso de ingenierías.
- Desarrollar un conjunto mínimo de demostradores de las diferentes opciones disponibles, que sirva de base para el desarrollo de los proyectos de los alumnos.

Dado que los alumnos deberán hacer al final un trabajo de tema libre usando los conocimientos adquiridos en la asignatura, y en ésta se van a tratar aspectos y herramientas muy diferentes, una manera de evaluar el éxito de la experiencia será observar cuántos alumnos deciden hacer alguna implementación de dispositivos IoT basándose en lo tratado en la asignatura.

IV. Selección de la plataforma

El primer paso a dar será la elección de la plataforma hardware y software a utilizar en las prácticas de la asignatura. Deberá ser, según se ha dicho, una plataforma barata, fácil de manejar, robusta y con suficiente base de conocimiento accesible. Hay gran cantidad de sistemas que cumplen con esta especificación, por lo que habría que realizar un estudio comparativo y elegir una de entre todas las posibilidades disponibles. Se encuentran en el mercado plataformas basadas en microcontroladores de propósito general, con conexión Ethernet. Igualmente, se encuentran numerosos desarrollos de sistemas basados en microcontroladores específicos de comunicaciones. Por último, también hay disponibles gran cantidad de sistemas que implementan soluciones basadas en sistemas embebidos, con un sistema operativo empotrado en la propia placa (*System on Chip*)

En la Figura 1 se muestran algunas de las placas analizadas. Las dos primeras (a y b) son microcontroladores ARM Cortex M4F a 100MHz, con potencia y memoria suficiente para gestionar las tareas del sistema microcontrolador y a la vez servir una página web, usando el cable Ethernet que llevan incorporado. La primera de ellas, basada en un microcontrolador de Texas Instruments [4] , cuenta con la ventaja añadida de que los alumnos que vengan de algunas titulaciones (en concreto del grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales) han visto algún microcontrolador similar en asignaturas anteriores, mientras que la segunda, de NXP [5] tiene un tamaño más comedido. Ambas cuentan con el handicap de implementar únicamente una conexión cableada, no pudiendo usarse de manera inalámbrica.

Las dos siguientes, de izquierda a derecha, son las basadas en chips de la compañía Espressif. Ambos son sistemas que integran la pila TCP-IP, la conexión wi-fi y un microcontrolador de bajo coste. El primero de ellos (c) es la placa Feather Huzzah ESP8266 [6], comercializada por Adafruit. Es un sistema con una cierta trayectoria y del que hay disponible bastante información. El segundo (d) está basado en el ESP32 [7], sucesor del anterior y bastante más potente, pero con menos base de desarrollos disponibles aún.

Los dos sistemas representados más a la derecha son dos sistemas empotrados que incorporan un sistema Linux embebido. De las dos, la primera (e) es una placa Omega2+ desarrollada por Onion [8], que dispone de una CPU a 580MHz, 128Mb de memoria DDR2 y 32Mb de memoria Flash para el almacenaje, aparte de disponer de tarjeta micro-sd. El segundo es la conocida RaspberryPi 3 [9], un pequeño ordenador monotarjeta con Linux (o Windows 10) como sistema operativo, a 1.2GHz de frecuencia de reloj y 1GB de memoria Ram disponible. Ambas tarjetas tienen la posibilidad de conectarse a internet inalámbricamente.

A. Plataforma hardware elegida

La plataforma que se eligió para esta experiencia fue la mostrada en tercer lugar, la ESP8266. Los motivos para elegir este sistema frente a los otros son diversos. Se citan a continuación los más significativos:

- Las tarjetas basadas en microcontroladores Cortex están pensadas para una conexión cableada a una red Ethernet, y aunque probablemente sean las más robustas de todas las probadas, resultan menos atractivas al no permitir la conexión desde dispositivos móviles (a no ser que se disponga de un router inalámbrico)
- Las tarjetas basadas en sistemas embebidos con Linux parecen demasiado *pesadas* para tareas sencillas, perdiendo además la capacidad de reacción en tiempo real, fundamental para sistemas de control. Por otra parte, ambas carecen de convertidor analógico/digital, lo que limita mucho el tipo de prácticas que se puedan hacer con ellas.
- De las dos tarjetas basadas en sistemas ESP, se ha elegido la primera por la gran base de desarrollos existentes, que facilita a los alumnos consultar fuentes diversas.

Aparte de los motivos citados, cabe destacar que es la más barata de todas ellas, teniendo en cuenta las posibilidades que tiene. Algunas de sus características más destacadas son:

Procesador ESP8266 a 80MHz, aunque con posibilidad de ejecutar a 160MHz.

- 4MBytes de memoria Flash
- Regulador de corriente y cargador de batería LiPo
- 9 Pines de E/S con funciones extra (pwm, i2c, spi)
- Una entrada analógica (1V máximo)
- Dos leds en la placa

Como se ha comentado previamente, el sistema dispone de manera nativa de un módulo wi-fi integrado, que puede funcionar tanto como interfaz como de punto de acceso, dando mucha versatilidad a la hora de usarse. Por lo tanto, se dispone de todos los elementos necesarios para realizar prácticas de sistemas electrónicos digitales, pudiendo conectar a la misma numerosos periféricos externos, como sensores i2c, pantallas spi o cualquier otro sistema que use estos estándares de comunicación entre circuitos.

B. Sistema de desarrollo

Una vez seleccionada la plataforma hardware, es necesario elegir el sistema de desarrollo a utilizar. De nuevo, la selección no es inmediata dado que se dispone de varios sistemas de desarrollo, cada uno con sus ventajas e inconvenientes.

La primera posibilidad es usar el lenguaje de intérprete de comandos que viene cargado: NodeMCU [10], basado en el lenguaje Lua [11]. Este lenguaje tiene una cierta trayectoria dentro de los sistemas embebidos, pero resulta poco conocido para los alumnos de la Escuela, y no tiene (al menos, de momento) mucha presencia en ámbitos académicos.

La segunda posibilidad que se presenta es cambiar el Firmware e implantarle un intérprete de Arduino [12]. Esta opción cuenta con la ventaja de que es un lenguaje que resulta familiar para algunos de los alumnos de la asignatura, aunque no se use en ninguna materia previa. Esto se debe al rápido crecimiento de la plataforma Arduino y al abaratamiento de las

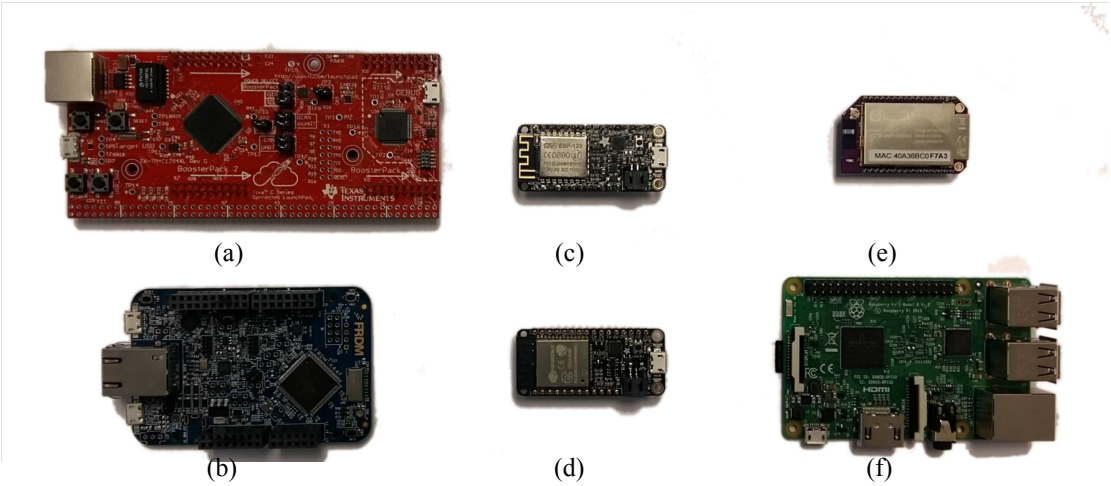


Fig. 1. Tarjetas disponibles para la implementación. (a) TIVA Connected Launchpad; (b) Freedom K64F de NXP, (c) Feather Huzzah ESP8266; (d) Feather Huzzah ESP32; (e) Omega2+; (f) Raspberry Pi 3

placas que ha llevado a una gran proliferación de cursos, presenciales y online, que tratan este entorno de desarrollo.

Por último, otra posibilidad es programar la tarjeta usando un firmware alternativo que implementa un intérprete de MicroPython [13]. Esta posibilidad resulta muy interesante, al ser Python un lenguaje de programación de mucha presencia en el mundo académico y científico, siendo actualmente el primero en el ranking que publica la página web de IEEE Spectrum [14].

Esta será la opción elegida, basándonos más en el interés del lenguaje en sí que en el conocimiento que puedan tener los alumnos de él. Una de las ventajas adicionales del lenguaje Python, que está presente también en MicroPython es la posibilidad de ir probando el código línea a línea o por bloques, antes de generar un código completo. Esto resulta muy práctico cuando no se tiene todavía un dominio del lenguaje.

En cuanto al entorno de desarrollo implementado, se puede usar simplemente un terminal de puerto serie (como TeraTerm o Putty), junto con la aplicación Ampy [15]. Esta era, de hecho, la única opción disponible el curso pasado y fue la que se implementó. El ciclo de trabajo resulta un tanto farragoso, ya que hay que:

- Editar un fichero Python en un editor de texto, por ejemplo el Notepad++ que incorpora ayudas de coloración de sintaxis
- Pasar el fichero con la aplicación Ampy
- Abrir una sesión con algún programa terminal (Putty)
- Ejecutar desde esta ventana, en la línea de comandos de Python, el script subido
- Volver a iterar en caso de fallo.

Desde hace muy poco (octubre de 2017) está disponible el entorno integrado EsPy, desarrollado por Jung Ervin, que se ofrece de manera gratuita [16] y que permite editar código Python con resalte de sintaxis y, simultáneamente, pasar dicho código al microcontrolador, bien de manera permanente o bien ejecutándolo por bloques en la línea de comandos de Python, observando la salida de la consola de Python, como se muestra en la Fig. 2

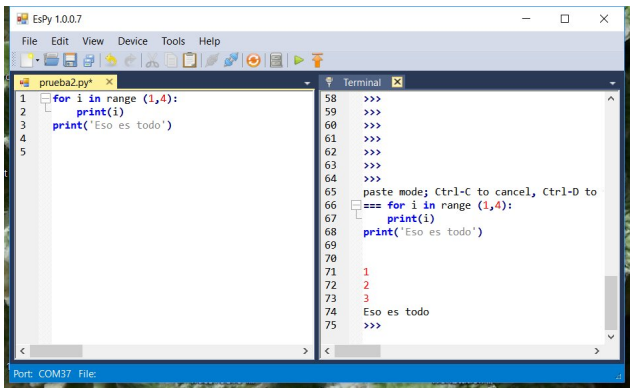


Fig. 2. Entorno de desarrollo EsPy

V. Demostradores de la tecnología

Una vez elegido el sistema electrónico y el entorno de desarrollo para la experiencia, sólo queda cubrir el último de los objetivos previstos, que era contar con una serie mínima de demostradores que sirvan a los alumnos como punto de partida para el desarrollo de proyectos de IoT basados en la plataforma elegida. Para ello, se han desarrollado un par de aplicaciones básicas en MicroPython que hacen uso de las entradas y salidas digitales, así como de la entrada analógica. En la entrada analógica se conectó un divisor resistivo con una LDR, para medir la luminosidad, ajustando los valores para que no llegase a saturar en condiciones de máxima luminosidad.

La primera de ellas es un servidor web mínimo, que crea una página web, accesible desde cualquier sistema conectado a la misma red inalámbrica. En esta página se puede actuar sobre uno de los led de la placa, encendiéndolo o apagándolo a voluntad. Igualmente, se representa en la página web el valor medido por el convertidor analógico-digital, con un botón de refresco para recargar el valor del mismo.

La segunda aplicación desarrollada se basa en un ejemplo suministrado por Adafruit, para hacer uso de su plataforma online de desarrollo de proyectos IoT, llamada Adafruit.io [17]. Esta aplicación hace uso del protocolo MQTT (Message Queue Telemetry Transport) para enviar periódicamente (cada 5s) datos de la luminosidad medida en la placa. Igual que en el caso anterior, se dispone de un botón en la interfaz web que permite encender o apagar el led de la placa.

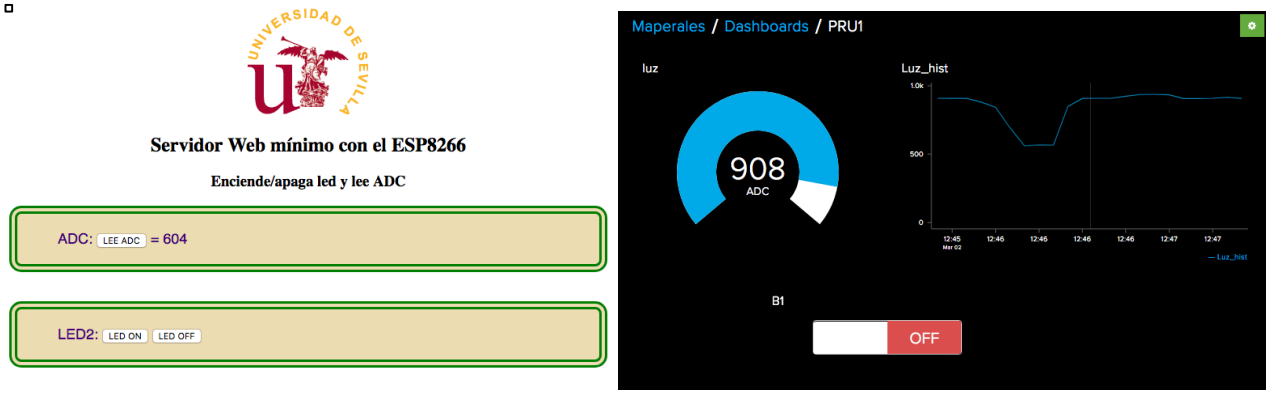
En la Fig. 3 se muestra el aspecto de ambas aplicaciones, abiertas en un navegador web. Los códigos de las aplicaciones se ofrecen a los alumnos libremente, y pueden ser consultados en el repositorio GitHub de la asignatura [18]

VI. Evaluación inicial y conclusiones

La experiencia se puso en práctica el curso pasado, por lo que sólo se tienen datos de un curso académico. Además, hay que tener en cuenta que, en concreto, el curso pasado hubo una gran cantidad de alumnos que provenían de titulaciones poco relacionadas con la electrónica (como Ingeniería de Organización Industrial).

Lo que resulta innegable es que los alumnos mostraron interés por la experiencia, y fueron todos ellos capaces de crear sus propias aplicaciones web. Sin embargo, a la hora de elegir temática para el trabajo de la asignatura, ninguno de ellos eligió hacerlo sobre esta plataforma. Hubo varios de ellos que usaron la Raspberry Pi, que también había sido utilizada en las prácticas, realizando aplicaciones de IoT, pero basadas en la Raspberry Pi. Esto es explicable por la mayor facilidad que supone programar en el propio dispositivo y tener a su disposición la potencia y los periféricos de un ordenador completo.

Los resultados de la Encuesta de Satisfacción desarrollada por la propia universidad son bastante positivos, obteniendo una puntuación de 4.35 (sobre 5). Resulta significativo que la valoración media de la titulación se queda en el 3.92 mientras que la media del área de conocimiento (tecnología electrónica) baja hasta el 3.86. Estos resultados, aunque referidos a un solo



(a) (b)

Fig. 3. Visualización de las aplicaciones de ejemplo desarrolladas. (a) página web estática con pulsadores para actuar sobre la placa; (b) página web dinámica creada sobre la plataforma Adafruit.io

curso académico, muestran que la asignatura resulta de interés para los alumnos, y nos animan a avanzar en esta línea.

Como primera conclusión, se deduce de la experiencia que los alumnos ven el Internet de las Cosas como algo interesante, que les motiva, y entienden el potencial de esta herramienta para el desarrollo de proyectos de electrónica de consumo. Sin embargo, parece que la plataforma elegida no ha resultado fácil o intuitiva para el desarrollo de aplicaciones.

Se propone, para el siguiente curso, hacer más hincapié en la descripción de la tarjeta y realizar más ejemplos de uso de la misma. Por otro lado, se estima que al disponer del entorno integrado EsPy los alumnos tendrán menos dificultades para realizar pruebas y alcanzar resultados.

Por último, se dispondrán de equipos suficientes como para poder cederlos en préstamo a los alumnos para que desarrollen el trabajo en modo no presencial, en sus domicilios o la biblioteca, por ejemplo.

REFERENCIAS

[1] Kopetz H. (2011) Internet of Things. In: Real-Time Systems. Real-Time Systems Series. Springer, Boston, MA

[2] J. Gomez , Juan F. Huete, O. Hoyos, L. Perez, D. Grigori "Interaction System Based on Internet of Things as Support for Education" Procedia Computer Science Vol. 21, 2013, pp 132-139

[3] M. G. Domingo and J. A. M. Forner, "Expanding the Learning Environment: Combining Physicality and Virtuality - The Internet of Things for eLearning," 2010 10th IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies, Sousse, 2010, pp. 730-731.

[4] http://www.ti.com/tool/EK-TM4C1294XL

[5] https://www.nxp.com/products/processors-and-microcontrollers/arm-based-processors-and-mcus/kinetis-cortex-m-mcus/k-seriesperformancem4/k2x-usb/freedom-development-platform-for-kinetis-k64-k63-and-k24-mcus:FRDM-K64F

[6] https://www.adafruit.com/product/2821

[7] https://www.adafruit.com/product/3405

[8] https://onion.io/omega2/

[9] https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/

[10] https://nodemcu.readthedocs.io/en/master/

[11] http://www.lua.org/

[12] https://github.com/esp8266/Arduino

[13] http://docs.micropython.org/en/latest/pyboard/

[14] https://spectrum.ieee.org/computing/software/the-2017-top-programming-languages

[15] https://github.com/adafruit/ampy

[16] https://github.com/jungervin/EsPy

[17] https://io.adafruit.com/

[18] https://github.com/maperales/ECONS

Aprendizaje Basado en Problemas como Metodología Docente de una Asignatura de Electrónica Básica en un Máster Universitario de Ingeniería Industrial

F. Barrero, J.L. Mora, M. Bermúdez, M. Perales
Departamento de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Camino de los descubrimientos s/n, 41092 Sevilla
mperales@us.es

***Abstract*—En este trabajo se presenta una metodología docente basada en la realización de proyectos, utilizada en una asignatura de electrónica básica adscrita al Máster Universitario en Ingeniería Industrial que se imparte en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. La nueva metodología docente reduce el contenido de las clases teóricas de la asignatura, aumentando la coordinación entre la teoría y la práctica mediante la realización de proyectos cooperativos. En el artículo se describe la experiencia y se muestran dos de los trabajos realizados por los alumnos durante el curso académico 2017-2018.**

***Index Terms*—PBL, teaching process.**

I. INTRODUCCIÓN

La enseñanza relacionada con las tecnologías electrónicas en las diferentes titulaciones de grado y máster de ingeniería se ha venido realizando tradicionalmente mediante la impartición de clases teóricas que se limitan a presentar al alumno multitud de conceptos teóricos y prácticos. Este planteamiento se ha demostrado insuficiente desde la reciente implantación del Espacio Europeo de Educación Superior y los nuevos planes de estudio asociados, fundamentalmente porque resulta poco motivante para bastantes alumnos al no acercar sistemas electrónicos reales a la clase. Para mitigar esta problemática se han venido desarrollando numerosas metodologías y estrategias docentes, como el aprendizaje basado en problemas (PBL del inglés *problem-based learning*).

El PBL es un método docente de reciente introducción [1] en el que se destaca al estudiante como protagonista de su propio aprendizaje. El concepto ha tenido una relativa aceptación en la enseñanza de la Ingeniería y en asignaturas relacionadas con la Electrónica, donde algunas experiencias recientes demuestran el interés que puede tener su utilización en la mejora del binomio enseñanza-aprendizaje [2-4]. Si bien no podemos considerar el PBL como la metodología docente panacea, sí parece interesante si se aplica en una titulación de Máster de tipo generalista, donde existe una gran diversidad en el alumnado, con procedencia de diferentes centros y titulaciones, y donde se pretende extender el conocimiento teórico y práctico del alumno en relación con la tecnología electrónica desde el punto de vista tecnológico e ingenieril, sin repetir los contenidos que se imparten respecto a los recibidos en los diferentes grados de ingeniería que los alumnos cursan con anterioridad a nuestro Máster.

En este trabajo se muestra el interés que tiene, y la sencillez que ofrece, la utilización del concepto PBL en una asignatura obligatoria denominada "Diseño Electrónico e Instrumentación Industrial" de primer curso del Máster Universitario en Ingeniería Industrial. La asignatura se imparte durante el primer cuatrimestre, según el plan de estudios vigente de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla (ETSI), tratándose de una asignatura obligatoria con 5 créditos asignados, de los cuales, 4 corresponden a créditos teóricos y 1 a créditos prácticos o de laboratorio. Esto se traduce, según la última planificación docente establecida en la ETSI, en trece semanas lectivas efectivas con dos clases magistrales de 1 hora y 15 minutos a la semana (2 horas y 30 minutos a la semana) y un total de 8,5 horas de prácticas. Los objetivos docentes específicos se centran en el diseño de circuitos y sistemas electrónicos y micro-electrónicos, la instrumentación electrónica (sensores, actuadores y técnicas de instrumentación), así como los buses de campo. En la siguiente sección se describe el contexto docente de la asignatura. Posteriormente se describe la experiencia desarrollada por dos grupos de alumnos de la asignatura durante el curso académico 2017-2018. Finalmente se exponen las conclusiones.

II. CONTEXTO DOCENTE

Según el enfoque de tipo generalista dado al Máster, que admite multitud de perfiles de alumnos de nuevo ingreso, la asignatura en cuestión se caracteriza por ser la segunda asignatura relacionada con la electrónica que cursarán la gran mayoría de los alumnos, a modo de continuación de una asignatura de electrónica general que se imparte de forma obligatoria en los Grados de Ingeniería en Tecnologías Industriales. El objetivo principal de la misma es incidir en conceptos relacionados con la Tecnología Electrónica, pasando del mero conocimiento de los dispositivos, componentes y

sistemas electrónicos al diseño de circuitos y sistemas electrónicos de aplicación industrial, asentando el conocimiento del alumno de la Tecnología Electrónica, de su aplicación industrial y en el manejo de la instrumentación electrónica. Es por tanto imprescindible que el alumno haya cursado previamente una asignatura básica de electrónica, donde se hayan visto conceptos relacionados con el funcionamiento y características de los dispositivos electrónicos y los circuitos electrónicos analógicos y digitales básicos (como sería el caso de la asignatura "Electrónica General", de segundo curso y segundo cuatrimestre del Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales impartido en la ETSI de Sevilla). Tras cursar la asignatura el alumno podrá:

- Ampliar el conocimiento sobre los dispositivos electrónicos y su utilización en el diseño de circuitos y sistemas electrónicos y micro-electrónicos de aplicación industrial.
- Conocer el procedimiento y pasos necesarios para diseñar circuitos electrónicos analógicos y digitales de aplicación industrial.
- Entender la necesidad de uso de sensores y actuadores para implementar sistemas electrónicos de aplicación industrial.
- Identificar cómo se integran los sensores y actuadores en un sistema electrónico de aplicación industrial.
- Estar familiarizado con el manejo y técnicas relacionadas con la instrumentación electrónica.
- Conocer las características y etapas básicas asociadas al diseño electrónico, así como de la existencia de herramientas de ayuda al diseño electrónico.
- Identificar las prestaciones e interés de las herramientas de ayuda al diseño electrónico.
- Entender el interés y utilidad de los sistemas de transmisión de información y datos como medio para la simplificación de la instalación y operación de sistemas electrónicos empleados en procesos productivos.

En cuanto a la relación con otras asignaturas, los conocimientos adquiridos en "Diseño Electrónico e Instrumentación Industrial" no tienen continuidad en los planes de estudio aprobados, al tratarse de un plan de estudio generalista. La metodología docente empleada incide en la creación de grupos de trabajo, de manera que los alumnos se enfrentan a un problema real, cercano al ámbito industrial en el que son expertos (los alumnos provienes de especialidades mecánicas, energéticas, químicas o de organización) y que deben solucionar diseñando e implementando un sistema electrónico real. El sistema es construido a lo largo del cuatrimestre y probado en los laboratorios del Departamento de Ingeniería Electrónica de la ETSI. Esto se traduce en:

- Clases magistrales en las que se impartirán algunas (aproximadamente un 35% del total) clases de teoría en pizarra con apoyo gráfico de transparencias (para exponer material docente y sobre todo presentar problemas a los alumnos que deben solucionar). La mayoría de las clases magistrales (el 65% restante) serán de seguimiento y apoyo al alumno para guiarlo en la solución de los problemas que se vayan planteando en la propia clase.
- Prácticas de laboratorio en las que los alumnos fabricarán el sistema electrónico diseñado (realización de la placa de circuito impreso o PCB −Printed Circuit Board en inglés−, montaje de componentes en la misma, puesta en marcha, calibración del sistema desarrollado y pruebas de funcionamiento).

Se plantean una serie de limitaciones asociadas al diseño para guiar la experiencia en clase. Las limitaciones que se establecen son:

- El sistema de desarrollo empleado será el MSP430 LaunchPad (Fig. 1), con entorno de programación Energía (Fig. 2).
- El simulador de circuitos electrónicos que emplearán los alumnos es Microcap.
- La herramienta de diseño de placas de circuito impreso que usarán para el diseño del sistema electrónico es Eagle.
- La puesta en marcha del sistema se realiza en los laboratorios del Departamento de Ingeniería Electrónica de la ETSI.
- Los sensores y actuadores que escojan deberán ser aceptados por el profesorado.



Fig. 1. Sistema de desarrollo MSP430 LaunchPad.

La asignatura se ha estructurado, siguiendo las restricciones impuestas por la ETSI para el curso 2017-2018, de la manera que se indica en la Tabla 1. La evaluación del alumno se realiza en base al seguimiento del trabajo realizado y su exposición y defensa en la última semana lectiva.

III. EJEMPLOS DE EXPERIENCIAS PBL

En este apartado se describen dos de los trabajos realizados por los alumnos, consistente el primero en el diseño de un anemómetro y veleta para un aerogenerador (Grupo de Trabajo 1), y el segundo en el desarrollo de un regulador de la velocidad de giro de un motor de continua (Grupo de Trabajo 2). Ambos trabajos han sido desarrollados por un grupo formado por 4 alumnos matriculados en la asignatura, cuyo conocimiento previo de electrónica se reducía a los propios de una asignatura básica de electrónica. En el caso que nos ocupa, se trataba de alumnos que habían cursado la especialidad mecánica en los grados universitarios en tecnologías industriales.

En el Grupo de Trabajo 1, los alumnos plantearon el desarrollo de un sistema electrónico que emulara el control de un aerogenerador atendiendo a la intensidad y a la dirección del viento, empleando un anemómetro y una veleta. Para poder realizar el proyecto, se empleó un

anemómetro de cucharas con un sensor capaz de medir velocidades de viento comprendidas en el rango 0-32,4 m/s, así como una chapa de plástico rígida acoplada al extremo de un potenciómetro multivuelta. La elección de los sensores de control del sistema fue hecha por los alumnos en clase, bajo la supervisión del profesorado. Las señales analógicas generadas por los sensores mencionados, se adaptaron para generar un nivel de tensión entre 0 y 3,6v que pudiese ser leído por los canales de entrada adscritos al CAD del sistema de desarrollo MSP430 LaunchPad. Para esto se escogió un amplificador operacional de tipo *rail-to-rail* y se diseñaron las etapas de adaptación de la señal analógica basadas en dicho amplificador operacional. Los circuitos diseñados se simularon empleando la versión de evaluación de Microcap. A continuación se implementó el diseño en una placa de circuito impreso. Los alumnos emplearon la versión de evaluación de Eagle para la realización de la placa, que fue revelada, taladrada y soldada en los laboratorios de la ETSI de Sevilla. La puesta en marcha del sistema se hizo en el laboratorio, antes de conectarla al Launchpad y empleando el instrumental disponible (polímetros, fuente de alimentación y generadores de onda programables, así como osciloscopios). Por último, se realizó en Energía todo el software de control del sistema, completándose el proyecto. En la Fig. 3 se muestra el resultado del mismo, donde se puede apreciar el sistema experimental completo que constituye el proyecto (figura superior izquierda), el esquemático de simulación en Microcap (figura inferior izquierda), así como un diagrama de flujo correspondiente a la programación implementada en Energía (figura derecha).

En el Grupo de Trabajo 2, se diseñó un sistema electrónico cuyo objetivo era regular la velocidad de giro de un motor de corriente continua, proporcionando el valor de dicha velocidad en cada instante. El trabajo desarrollado por este grupo de alumnos transcurrió de manera análoga al caso anterior, aunque partiendo obviamente de una elección diferente de sensores, que a su vez generan un diseño distinto de los circuitos de adaptación, etc. En todo caso, se emplearon las mismas herramientas para el diseño del sistema: Microcap, Eagle y Energía para completar el desarrollo del proyecto. En la Fig. 4 se muestra el resultado del mismo, donde se puede observar igualmente el sistema experimental completo (figura izquierda), así como el esquemático del circuito eléctrico simulado en Microcap (figura superior derecha) y el esquema final del diseño de la placa de circuito impreso realizado con la herramienta Eagle (figura inferior derecha). Destaca en este trabajo, por su complejidad respecto a otros, el software que implementa el microcontrolador, especialmente en cuanto a la estimación de la velocidad de giro del motor para su regulación, algo nada simple y menos si se tiene en cuenta que el MSP430 no está preparado para el control de motores, el software Energía tampoco facilita el acceso al hardware del microcontrolador y los alumnos desconocen las bases de funcionamiento de los dispositivos encoder o tacogeneradores.

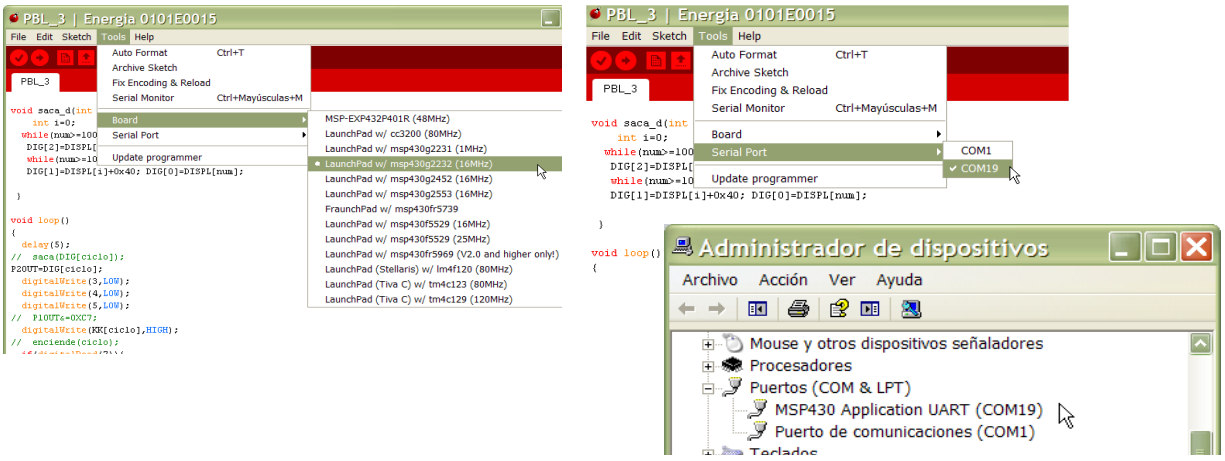


Fig. 2. Entorno de programación Energía.

Tabla 1. Programa de la asignatura "Diseño Electrónico e Instrumentación Industrial".

Temario	Horas	Semana
Clase 1: Presentación.	1h 15‘	1
Clase 2: De la idea al producto.	1h 15’	1
Clase 3: Herramientas de ayuda.	1h 15’	2
Clase 4: Seguimiento (especificación de trabajos: elección de sensor).	1h 15’	2
Clase 5: OpAmp.	1h 15’	3
Clase 6: Elección de OpAmp reales.	1h 15’	3
Clase 7: Seguimiento (presentación y cierre de especificación de trabajos).	1h 15’	4
Clase 8: Herramienta de diseño de circuitos electrónicos.	1h 15’	4
Clase 9 y 10: Seguimiento de trabajos.	2h 30’	5
Clase 11: Herramienta de diseño de placas de circuito impreso.	1h 15’	6
Clase 12 a 14: Seguimiento de trabajos.	3h 45’	6,7
Clase 15: Energía.	1h 15’	8
Clases 16 a 24: Seguimiento de trabajos.	11h 15’	8-12
Prácticas 1 a 4: Realización y puesta en marcha de diseños.	8h 30’	9 a 12
Clases 25 y 26: Evaluación de trabajos.	2h 30’	13

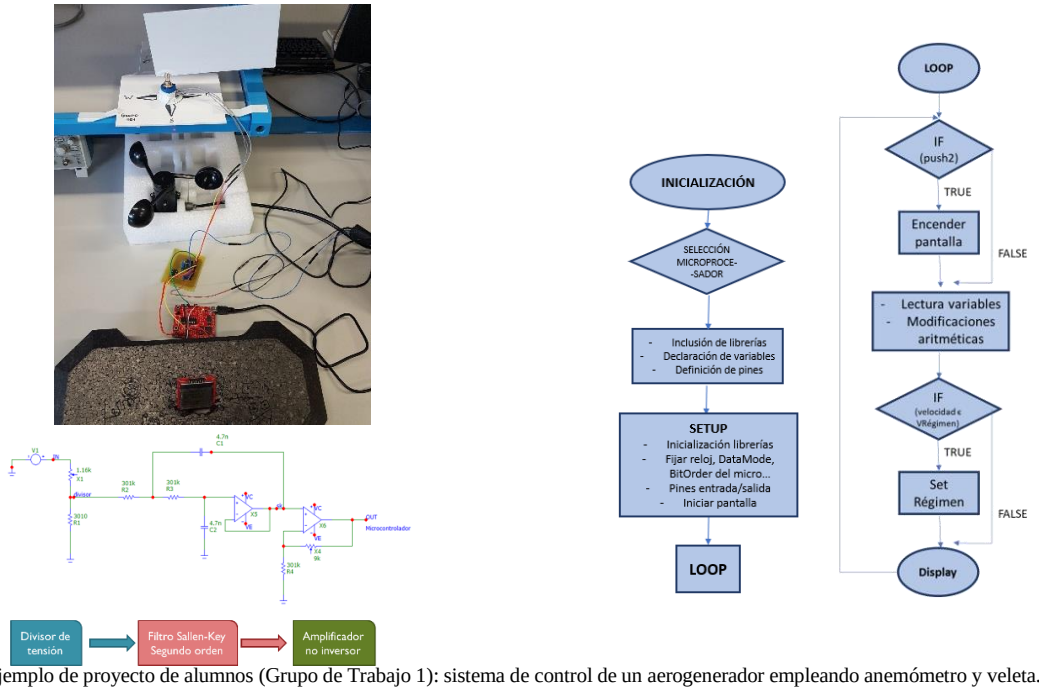


Fig. 3. Ejemplo de proyecto de alumnos (Grupo de Trabajo 1): sistema de control de un aerogenerador empleando anemómetro y veleta.

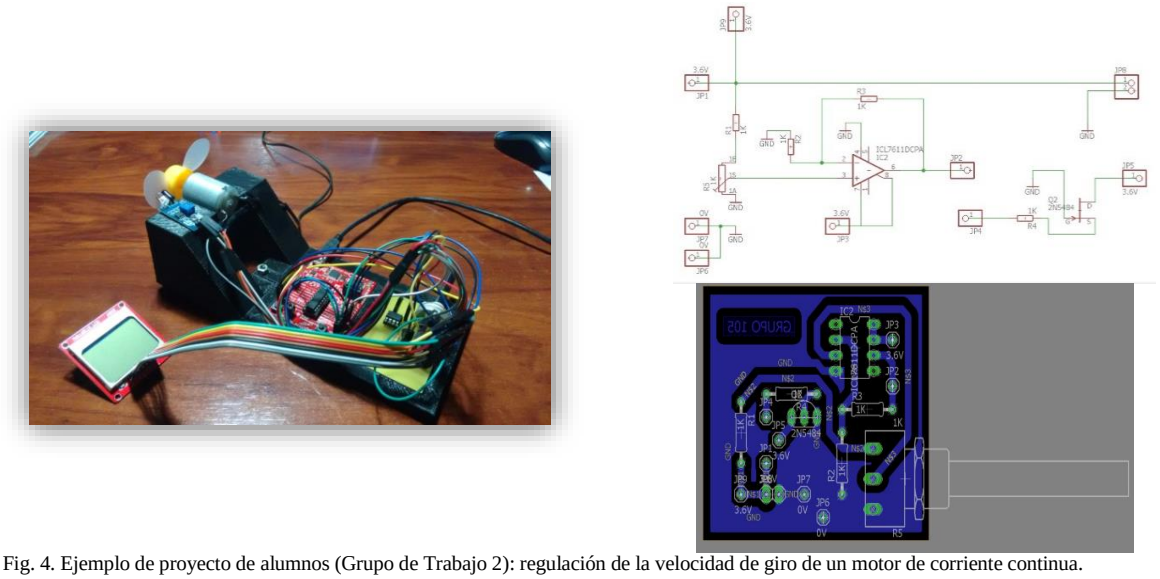


Fig. 4. Ejemplo de proyecto de alumnos (Grupo de Trabajo 2): regulación de la velocidad de giro de un motor de corriente continua.

Por último, cabe destacar que ambos proyectos contemplan la utilización de displays LCD para la monitorización de las magnitudes obtenidas del procesamiento de los sensores. Esto ha permitido introducir el concepto de diseño hardware de sistemas electrónicos basados en microprocesador, así como mostrar al alumno el interés de los buses de campo al tratarse de dispositivos I2C o SPI.

IV. RESULTADOS OBTENIDOS

Desde un punto de vista meramente subjetivo, indicar el elevado interés mostrado por los alumnos al realizar la asignatura, valorada muy positivamente por estos y por la comisión de seguimiento para la implantación del Máster Universitario en Ingeniería Industrial de la ETSI. El principal inconveniente para el desarrollo de este tipo de experiencias es el elevado número de alumnos matriculados en la asignatura (unos 140 durante el curso académico 2017-2018), que ha dado lugar a la gestión de un total de 37 grupos de trabajo por parte de los profesores de la asignatura. Otro problema importante aparece en el reparto de alumnos por grupos que se hace por especialidad en el Máster. Esto hace que en la práctica no haya un reparto equilibrado de alumnos por aula, lo que genera problemas por sobrecarga lectiva en algunas aulas. En concreto, y en el curso 2017-2018, nos hemos encontrado con un número de alumnos muy elevados en una de las especialidades (Mecánica), estando ese grupo "penalizado" en cuanto al seguimiento de los trabajos en clase respecto del resto. Los tres grupos de clase tenían un total de 58, 41 y 21 alumnos, lo que claramente ha perjudicado la atención y seguimiento por parte del profesorado en los dos primeros grupos respecto del tercero, algo resaltado por los alumnos.

No todos son parabienes en los resultados obtenidos. Si bien se ha logrado involucrar a unos alumnos que tienen escasos conocimientos y poco interés en la electrónica mediante el desarrollo de trabajos prácticos, la complejidad del mismo no siempre es alta con lo que los resultados obtenidos en muchos casos es discutible, como mínimo. Sería razonable complementar la evaluación de los trabajos con exámenes convencionales que fuercen al alumno a estudiar los contenidos teóricos y permitan modular las calificaciones. Esto será tenido en cuenta el próximo curso, en el que además de un trabajo se evaluará a los alumnos mediante la realización de un examen.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta la metodología docente empleada en una asignatura de electrónica adscrita al Máster Universitario de Ingeniería Industrial impartido en la ETSI de Sevilla. Al tratarse de un Máster generalista que engloba a alumnos de muy diversa procedencia y perfil, se ha desarrollado una metodología docente que combina la impartición de clases tradicionales con la realización y seguimiento de un trabajo colaborativo, que es empleado a su vez para la evaluación de los alumnos. Se han expuesto dos de los trabajos que se han desarrollado a lo largo del curso 2017-2018, para tener una idea de su alcance, y comentado las impresiones que genera esta metodología docente en el alumnado y profesorado. Destacar que aunque este tipo de experiencias es en general positiva, requiere de una continua adaptación y mejora, así como de un esfuerzo notable por parte del profesorado para el correcto seguimiento de los alumnos.

RECONOCIMIENTO

Los autores de este trabajo desean mencionar el interés mostrado en la asignatura por los alumnos cuyos trabajos se exponen a modo de ejemplo: D. Pablo Blázquez Carmona, D. Alfonso García-Agúndez Blanco, D. Javier Guerra Pérez y D. Javier Miguel Juliá Lerma (Grupo de Trabajo 1, autores del prototipo de anemómetro y veleta para un aerogenerador) y D. José Manuel Díaz Cano, D. José Rafael García Viegas, D. Jaime López Iglesias y D. Antonio Guarnido Barrera (Grupo de Trabajo 2, autores del regulador de la velocidad de giro de un motor de continua).

REFERENCIAS

[1] Araujo, U.F. i Sastre, G. (2008), El Aprendizaje Basado en Problemas. Una nueva perspectiva de la enseñanza en la Universidad. Barcelona: Gedisa.

[2] Perales, M., Barrero, F., Toral, S. “Experiencia PBL en una Asignatura Troncal de Electrónica General”, 11º Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica (TAEE’2012), Vigo, España, Junio de 2012. Premio al mejor artículo en el área de metodologías docentes.

[3] Perales, M., Barrero, F., Toral, S., Durán, M.J. “Experiencia PBL en una Asignatura básica de Electrónica”, IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje, Vol. 7, No. 4, pp. 223-230, 2012.

[4] Perales, M., Barrero, F., Toral , S. “Análisis de una Experiencia PBL en una Asignatura Troncal de Electrónica General.”, 12º Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica (TAEE’2014), Bilbao, España, Junio de 2014. Finalista al permio al mejor artículo del congreso.

PILAR: Plataforma de federación de laboratorios remotos VISIR de electrónica analógica

Unai Hernandez-Jayo
Universidad de Deusto
Bilbao, España)
unai.hernandez@deusto.es

Javier Garcia-Zubia
Universidad de Deusto
Bilbao, España)
zubia@deusto.es

Manuel Castro
UNED
Madrid, España
mcastro@ieec.uned.es

Felix Garcia Loro
UNED
Madrid, España
fgarcialoro@ieec.uned.es

Kati Valtonen
OMNIA
Espoo, Finlandia
kati.valtonen@omnia.fi

Elio San Cristobal
UNED
Madrid, España
elio@ieec.uned.es

Gabriel Díaz Orueta
UNED
Madrid, España
gdiaz@ieec.uned.es

Alejandro Macho
UNED
Madrid, España
amacho@ieec.uned.es

Gustavo Alves
Politécnico do Porto
Porto, Madrid
gca@isep.ipp.pt

André Fidalgo
Politécnico do Porto
Porto, Madrid
anf@isep.ipp.pt

Arcelina Marques
Politécnico do Porto
Porto, Madrid
mmr@isep.ipp.pt

Andreas Pester
Fachhochschule Kärnten
Villach, Austria
A.Pester@fh-kaernten.at

Christian Kreiter
Fachhochschule Kärnten
Villach, Austria
c.kreiter@fh-kaernten.at

Doru Ursutiu
IAOE
Villach, Austria
udoru@unitbv.ro

Carla Garcia
EVM
Islas Canarias, España
carla.garcia@evm.net

***Resumen*—Los laboratorios remotos son ya una herramienta de enseñanza/aprendizaje en diferentes campos de la ingeniería y de la ciencia. El laboratorio remoto VISIR es un ejemplo paradigmático de esta nueva metodología en el campo de la electrónica analógica ya que el alumno puede montar y medir circuitos reales de un modo satisfactorio. En la actualidad en Europa hay cinco instancias desplegadas y activas de VISIR y en Sudamérica hay 5 más, cada una de ellas ofrece distintos circuitos eléctricos y electrónicos de manera que el usuario debe saber dónde está desplegado el circuito que él quiere montar y desplegar para poder acceder a él, lo que es una clara limitación. La solución al problema pasa por federar dicho grupo de laboratorios remotos**

Keywords*— *laboratorios remotos, electrónica analógica

I. INTRODUCCIÓN

Los laboratorios remotos comenzaron su andadura a finales del siglo XX y ya en este siglo XXI se han convertido en una opción más dentro de las herramientas de enseñanza/aprendizaje en el aula, y en una herramienta inevitable para los cursos a distancia en ingeniería.

En este contexto, la formación práctica es extremadamente importante, especialmente en los programas de titulación técnica [1][2]. Por lo tanto, las universidades e instituciones educativas confían en la experimentación para construir oportunidades exitosas de aprendizaje interdisciplinario en los cursos técnicos [3]-[5]. Las sesiones prácticas de laboratorio requieren la presencia de personal técnico y docente. También se requiere una sala adecuada para alojar bancos de trabajo replicados con el fin de proporcionar un número adecuado de bancos de trabajo para optimizar el programa de trabajo de dicho personal. Por lo tanto, debido a estas limitaciones, los laboratorios remotos pueden jugar un papel fundamental [6].

En el ámbito concreto de la ingeniería y de la electrónica en particular, la experimentación práctica en electrónica es un campo especialmente favorable al uso de laboratorios remotos, y el mejor de ellos es el laboratorio remoto VISIR, tanto por despliegue real como por difusión y premios internacionales. En la actualidad hay 10 instancias de VISIR desplegadas en el mundo, 5 en Europa y 5 en Sudamérica.

El uso intensivo de VISIR ha ido haciendo cada vez más visibles y claras sus limitaciones. En el caso de VISIR su diseño no permite el montaje de “todos” los circuitos electrónicos posibles, sino solo una parte de ellos, por ejemplo: circuitos DC, circuitos AC, circuitos con AO, etc. De esta manera si un alumno quiere montar y medir un circuito DC específico debe saber dónde se encuentra situado mediante un “mapa” de circuitos, para luego acceder con sus credenciales a un VISIR concreto. Esto es una limitación clara, ya que el alumno prefiere montar el circuito y al pulsar “enviar” que sea transparente para él el envío a uno u otro VISIR.

La solución a este problema se denomina federación, y aunque tiene distintos significados para distintos laboratorios remotos debe ser entendido como la característica que permite que un conjunto de laboratorios remotos se comporte como uno solo, sobre todo desde el punto de vista del alumno. Este es un problema complejo de carácter técnico que exige desarrollo software y hardware, pero también exige el diseño y puesta en marcha de acuerdos interinstitucionales para permitir dicha federación.

El proyecto ERASMUS+ PILAR (2016-1-ES01-KA203-025327) liderado por UNED en España aborda este problema con el objetivo de aportar a la comunidad de profesores y alumnos de electrónica la federación de laboratorios remotos VISIR. PILAR se apoya en el proyecto VISIR+ también financiado dentro de ERASMUS+ (561735-EPP-1-2015-1-PT-EPPKA2-CBHE-JP).

En este artículo se aborda en un primer lugar el paradigma de la federación de laboratorios remotos, para posteriormente describir cuál ha sido la primera aproximación llevada a cabo en el marco del proyecto PILAR

II. CONCEPTOS PREVIOS

A. *Sistemas de gestión de Laboratorios Remotos*

Muchas de las características desarrolladas en un laboratorio remoto (autenticación, autorización, programación, seguimiento de usuarios...) son reutilizables de un laboratorio remoto a otro. Debido a esta razón, se han creado los sistemas de información que proporcionan estos servicios, como por ejemplo: MIT iLabs, Labshare Sahara y WebLab-Deusto. Estos sistemas son independientes de la instalación, por lo que pueden ser referenciados como laboratorios remotos de propósito general en contraste con laboratorios remotos de propósito específico. Sin embargo, dado que la mayor parte de su trabajo es facilitar tareas de gestión, estas sistemas son denominados como Sistemas de Gestión de Laboratorios Remotos (RLMS por sus siglas en inglés). Los RLMS vienen con directrices y herramientas de desarrollo de software para desarrollar experimentos remotos. De esta manera, los RLMS aceleran el proceso de desarrollo de laboratorios remotos: los profesores que quieren crear un laboratorio remoto no necesitan trabajar en la programación de los servicios de autenticación, autorización, etc. pero manteniendo el foco de hacer que el experimento esté disponible a través de Internet.

Adicionalmente, los RLMS proporcionan herramientas de administración, por lo que los profesores pueden utilizarlos para añadir estudiantes, conceder permisos en ciertos laboratorios, rastrear estudiantes, etc. La ventaja de emplear estos sistemas es que una vez que añaden una nueva funcionalidad transversal, todos los experimentos desarrollados con que RLMS la adquirirán automáticamente. Por ejemplo, si un RLMS no soporta LDAP (un protocolo de directorio común en las universidades que se utiliza para autenticar y autorizar usuarios), y en la próxima versión lo soporta, automáticamente todos los experimentos desarrollados con ese RLMS desplegarán esa nueva funcionalidad. De hecho, esta flexibilidad de los RLMSs es lo suficientemente interesante como para crear esfuerzos para integrar en ellos los sistemas previamente existentes. Por ejemplo, en [7] el laboratorio remoto VISIR está integrado en MIT iLabs, o en [8] está integrado en WebLab-Deusto.

Una de las cosas que los RLMSs facilitan es el desarrollo de los sistemas de reservas, por ejemplo. Hay dos enfoques principales: hacer cola o hacer una reserva basada en un calendario. En la actualidad, el RLMS iLab es compatible con colas para laboratorios por lotes y reservas para laboratorios interactivos.

Labshare Sahara permite tanto la reserva como la cola para laboratorios interactivos. WebLab-Deusto soporta colas para laboratorios interactivos y por lotes. En cualquier caso, el concepto de conceder acceso exclusivo a un laboratorio durante cierto tiempo persiste en todos los RLMS. Para ofrecer más slots disponibles en el calendario o para hacer que la cola se mueva más rápido, la carga de usuarios puede equilibrarse entre las diferentes copias del experimento, siempre y cuando los costes del experimento lo permitan. La Figura 1 representa este concepto: un RLMS está manejando dos copias del mismo experimento y cuatro estudiantes intentan usarlo, así que los dos primeros usuarios usarán el experimento, y los otros dos esperarán en una cola común. Esta característica, llamada balance de carga local, se implementa tanto en Labshare Sahara como en WebLabDeusto [9].

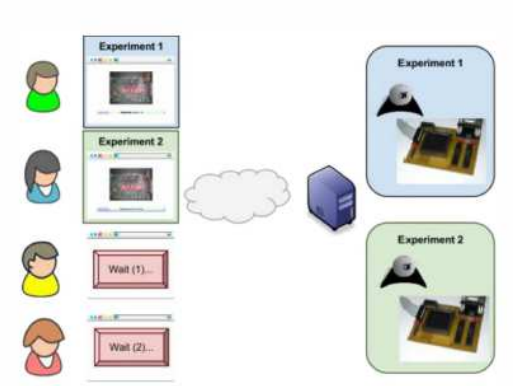


Fig. 1. Balanceo de Carga

B. *Federación de laboratorios remotos*

Una característica única de los laboratorios remotos en comparación con los laboratorios tradicionales es que la distancia del estudiante al equipo real no es un problema, por lo que los laboratorios remotos pueden ser compartidos con diferentes instituciones, de modo que una entidad puede compartir un laboratorio con otra entidad. Nos referimos a las entidades más que a las universidades, ya que no necesitan ser universidades: los centros de investigación pueden estar interesados en compartir recursos locales como parte de un acuerdo, y las escuelas secundarias serían razonablemente consumidores.

Esta compartición puede ser gestionada de forma directa y sencilla: la entidad proveedora (el lugar donde se encuentra el equipo) crea cuentas de usuarios de la entidad consumidora (la que está interesada en utilizar el equipo de la universidad proveedora para sus estudiantes). Los estudiantes de la entidad

consumidora acceden directamente en la entidad proveedora y la entidad proveedora realiza todo el trabajo: autentica al usuario, le autoriza a utilizar el laboratorio y le proporciona el acceso directo a los datos de la entidad proveedora.

Hay múltiples problemas con esta solución. En primer lugar, la entidad proveedora debe crear y gestionar las cuentas de usuario de todas las universidades consumidoras interesadas. Este es un escenario complejo, en el que intervienen una amplia variedad de consumidores -como universidades extranjeras e incluso escuelas secundarias que simplemente no hablan el idioma de la entidad proveedora-, de modo que este enfoque no es fácilmente escalable. En segundo lugar, la gestión de este enfoque es engorrosa: las universidades consumidoras tendrían que notificar a los proveedores cualquier cambio y no se dispondría de bases de datos o protocolos locales como LDAP. En tercer lugar, la entidad propietaria no puede llevar una contabilidad adecuada de los usos realizados: debe confiar en la entidad proveedora.

Si ambas instituciones llegan a un acuerdo en el que los usuarios de la entidad consumidora pueden acceder hasta 10.000 veces, no habrá forma de que la entidad consumidora audite esto si la entidad proveedora dice en algún momento "ya ha alcanzado el límite".

Para manejar estos y otros problemas, se requiere un modelo de dos caras (Figura 2), donde ambas universidades tienen el mismo framework software que maneja este intercambio. La entidad consumidora puede autenticar y autorizar a los estudiantes locales, y una vez autorizada, el framework local se pondrá en contacto con la entidad proveedora y solicitará un espacio. De esta manera, la entidad proveedora no necesita administrar los estudiantes y cursos de la entidad consumidora, y la entidad consumidora puede rastrear todas las solicitudes realizadas a la entidad proveedora, pudiendo obtener información sobre los accesos de los estudiantes y auditar el uso general. En este sentido, el sistema MIT iLabs ha estado compartiendo efectivamente laboratorios remotos en todo el mundo durante años [10]. Diferentes universidades pueden utilizar el framework del MIT iLabs para desarrollar, mantener y compartir sus sistemas remotos y laboratorios con otras universidades. En el modelo federativo definido por iLabs Shared Architecture (lSA), se pueden compartir dos tipos de laboratorios remotos: los laboratorios por lotes (utilizando colas) y los laboratorios interactivos (utilizando un sistema de reservas basado en el calendario).

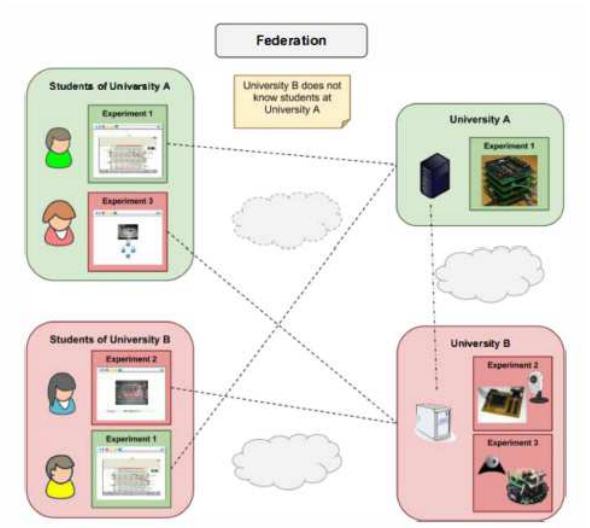


Fig. 2. Esquema de Federación de laboratorios remotos

III. ¿POR QUÉ ES NECESARIO UN MODELO DE FEDERACIÓN PARA EL USO DEL LABORATORIO REMOTO VISIR?

Para entender la necesidad de federación de los nodos que actualmente existen en la red VISIR, primero es conveniente entender cómo funciona el laboratorio remoto VISIR y cuáles son sus limitaciones a la hora de diseñar circuitos.

Todos los nodos VISIR tienen una limitación en cuánto a los componentes disponibles y la variabilidad de circuitos factibles. Esta limitación se deriva del número de tarjetas de componentes instalados y del número de componentes instalados en todas ellas (existen diferentes modelos de tarjetas que permiten entre 2 y 10 componentes, en función del número de shortcuts necesarios). Existen por lo tanto tres versiones de placas de componentes:

1. Placa de componentes Versión C: permite sólo diez relés de doble polo. Por lo tanto, se pueden instalar hasta 10 componentes/cortes cortos.
2. Placa de componentes Versión D/E: soportan 6 relés de doble polo -destinados a componentes de dos polos- y 8 relés de un polo -destinados a componentes con más de dos polos-. Cualquiera de los dos relés unipolares adyacentes puede ser reemplazado por un relé bipolar. Se pueden instalar hasta 14 componentes/cortes cortos.
3. Tarjeta de componentes 2C versión B: se pueden instalar dos componentes de dos patitas/conectores, pero conecta cada patita de componente con uno de los nueve nodos disponibles en la arquitectura VISIR (A-I).

En las tarjetas componentes C y D/E, mediante la instalación de componentes y su cableado a los nodos de la matriz, se define cómo los componentes están interconectados en la matriz de conmutación, definiendo así a qué nodos están conectados. Cada componente se conecta a los nodos de la matriz en cada caso, en función de la señal de control del relé. Los nodos de matriz son de A a I y 0 (GND). Las sondas del

osciloscopio, así como las puntas de test del DMM, están conectadas dinámicamente a cualquier nodo. El generador de funciones está conectado internamente al nodo A y las fuentes de alimentación (6 V; +20 V; -20 V) pueden estar conectadas a cualquiera de los nodos descritos anteriormente.

La Figura 3 muestra las conexiones necesarias para realizar un rectificador de media onda, comparando el comportamiento de dos diodos (1N4007 y BAT42) con características diferentes. Este experimento requiere el uso de 10 relés en las placas de componentes (2 diodos, 2 resistencias y 4 cortocircuitos). Cuanto más complejo sea el circuito, más relés necesitará. Obviamente, estos componentes y cortocircuitos pueden ser reutilizados para otros experimentos, pero siempre se conectarán a los nodos conectados en la matriz de conmutación del relé; por ejemplo, a partir de la Figura 3, la resistencia 3K01 conectada a los nodos E y F, y la resistencia 10K conectada a los nodos E y F también se pueden conectar en paralelo (nodos E y F), pero claramente es imposible conectarlos en serie. Por lo tanto, el número de circuitos factibles es una fuerte limitación para un sistema aislado. Además, incluso una federación tendrá problemas para ofrecer todos los circuitos posibles construibles basados en un conjunto relativamente grande de componentes [11].

```
VFGENA_FGENA1      A 0       max:5
VDC+6V_3       D   max:6     imax:0.5
VDCCOM_24_2 0

SHORTCUT_8_12      F 0
R_2_8              E F       3K01
R_2_1              E F       10K
SHORTCUT_5_14      A D
SHORTCUT_1_12      C D
D_3_1              C E       1N4007A
SHORTCUT_2_5       B C
D_3_8              C E       BAT42
SHORTCUT_6_12      A F
```

Fig. 3. Ejemplo de fichero que describe las conexiones disponibles para un tipo de circuitos sobre el laboratorio VISIR.

En este escenario, una federación de sistemas VISIR no sólo proporcionará un importante repositorio de circuitos y variaciones basadas en sus componentes, sino también una optimización de los recursos de tiempo y componentes en cada nodo.

En un momento en el que el número de laboratorios VISIR está aumentando gracias a proyectos como el VISIR+ [12], se hace necesario disponer de mecanismos que permitan a las instituciones que los poseen y a las instituciones que emplean este laboratorio a través de ellas, de un sistema que permita de una manera sencilla compartir los recursos sin necesitar tener que replicar experimentos en múltiples instancias.

En cuanto al uso compartido de laboratorios mediante mecanismos de federación: una vez que los estudiantes de una institución determinada pueden acceder a través de Internet a un laboratorio concreto, también pueden acceder a él los estudiantes de otras universidades. Esta ventaja puede ser bidireccional a gracias al despliegue de la federación: dos instituciones que proporcionan el mismo laboratorio remoto -o la misma experiencia práctica de un laboratorio remoto específico- pueden equilibrar la carga de sus clientes/usuarios, tal y como hemos visto en la sección anterior. Esta característica mejora la participación de los usuarios en el entorno remoto del laboratorio debido a la mejora de la respuesta y disponibilidad de tiempo.

El análisis realizado en el Intellectual Output 2 del proyecto PILAR se ha resumido en un documento que describe los diferentes tipos de prácticas, su uso y niveles de formación que ofrecen los nodos VISIR. Dicho documento ha servido para proponer cómo mejorar técnicamente los diferentes nodos VISIR de cara a su federación, cómo complementar los diferentes catálogos de circuitos disponibles y cómo establecer prácticas más pedagógicas para los diferentes niveles educativos. Las conclusiones preliminares de esta sección fueron:

- Todos los experimentos disponen de material de orientación o aprendizaje desarrollado como material de apoyo para los usuarios.
- Los campos principales de conocimiento en los que se usa el laboratorio VISIR son: electricidad, electrónica analógica básica, electrónica y electrónica de potencia y física.
- En cada sistema VISIR están disponibles experimentos básicos de electrónica como, por ejemplo, las leyes de Kirchhoff, la ley de Ohm, circuitos RL o RC, transistores, amplificadores operativos, filtros pasivos, etc.
- El nivel educativo en el que se utilizan los experimentos también es similar estando entre bachillerato (15 - 18/19), licenciatura, máster.

El documento mencionado anteriormente ha permitido identificar vacíos de experiencias práctica, temas clave y comunes o nuevas posibilidades. Hasta ahora se están analizando 3 posibles enfoques:

- Redundancia. Este enfoque permite la escalabilidad, fiabilidad y disponibilidad a expensas de la diversidad. Si un nodo VISIR no está disponible por cualquier motivo, su esfuerzo puede ser soportado por otros nodos. Es decir: si un usuario está accediendo al VISIR en su institución, pero está fuera de servicio, será redirigido automáticamente a otro nodo VISIR disponible (en otra institución). En este caso, el mecanismo federativo debe saber qué circuitos están disponibles en qué nodos VISIR.
- Diversidad. Cada nodo VISIR puede especializarse en un tema específico (aprovechando la reutilización) e implementar un conjunto de circuitos (circuitos DC, circuitos AC, circuitos de Amplificadores Operativos, etc.). El usuario no sólo tendrá acceso al conjunto de experimentos de su institución, sino también al conjunto total de experimentos de todos los nodos VISIR. Este enfoque faculta al catálogo de experimentos a expensas de la escalabilidad y la fiabilidad.
- Enfoque combinado. Utilizando una combinación de los dos enfoques anteriores, potenciando la escalabilidad para esos experimentos comunes e implementando experimentos diferentes y menos solicitados en cada nodo.

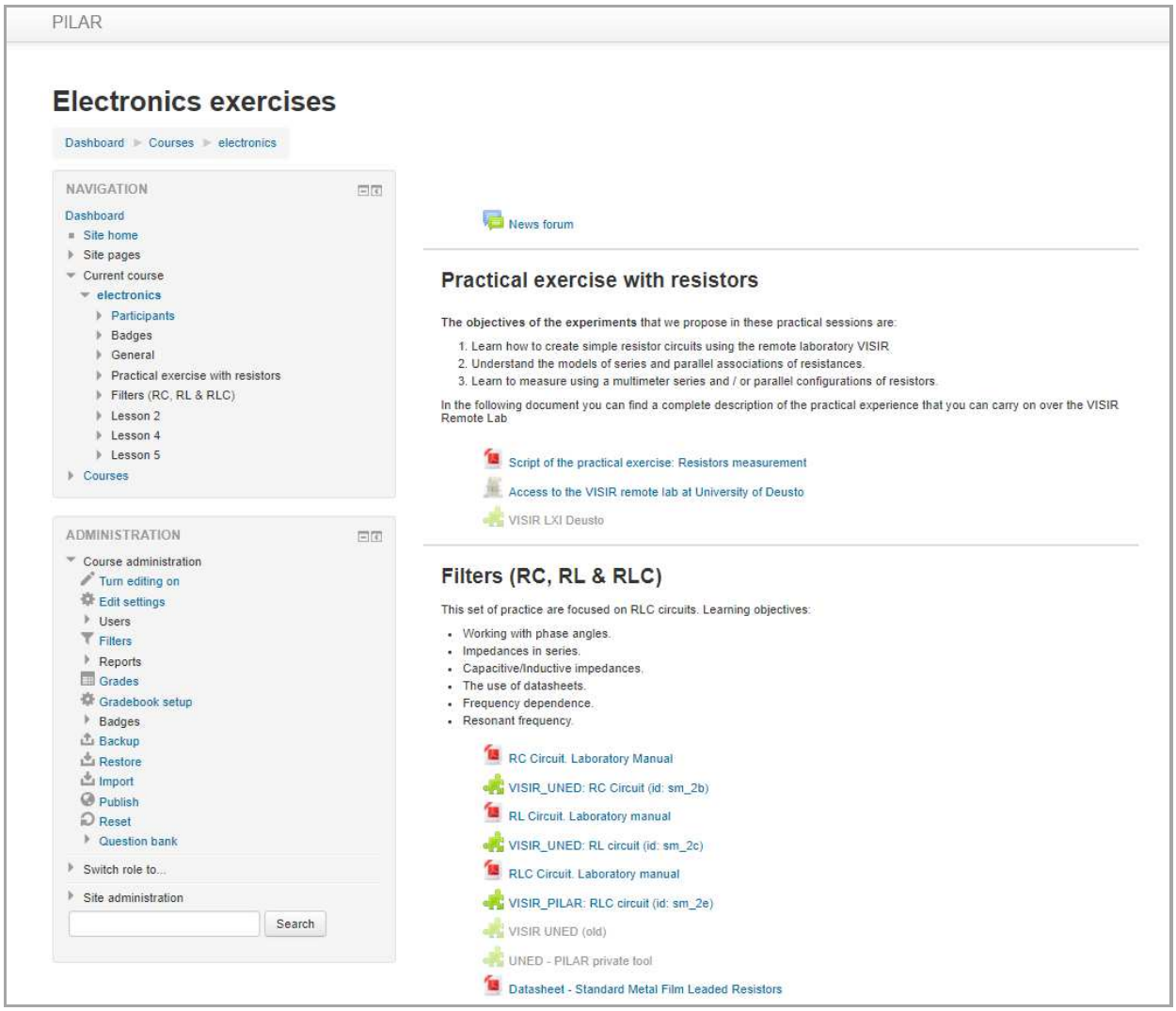


Fig. 4. Página web basada en Moodle para la compartición de recursos educativos basados en el laboratorio remoto VISIR

IV. PRIMERA VERSIÓN DEL SISTEMA DE FEDERACIÓN PILAR

En el contexto del proyecto PILAR, el laboratorio remoto VISIR está desplegado en las 5 universidades que forman parte del consorcio: BTH, UDEUSTO, ISEP, UNED y CUAS. Una de las características más interesantes de este laboratorio es que apoya a los estudiantes simultáneos usando sesiones independientes. Esto significa que, dado que cada acceso al laboratorio es muy rápido (décimas de segundo), los accesos se multiplexan con relés, por lo que los usuarios finales no se dan cuenta de que otros usuarios utilizan el mismo equipo de manera concurrente.

A modo de ejemplo, en la Universidad de Deusto, el laboratorio VISIR se utiliza regularmente con hasta 60 usuarios a través del RLMS WebLab-Deusto. Si hay más usuarios, WebLab-Deusto creará una cola para que ingresen cada vez que algún estudiante actual cierre la sesión o pase el tiempo asignado.

Dadas las características descritas de WebLab-Deusto, se pueden utilizar los siguientes esquemas (pongamos el ejemplo de que Deusto e ISEP comparten para simplificar el escenario):

- Cualquier estudiante (de ISEP, Deusto u otras instituciones del consorcio) puede acceder al VISIR de Deusto para una configuración particular que sólo está disponible en Deusto.
- Cualquier estudiante puede acceder al VISIR en ISEP para una configuración particular que sólo está disponible en ISEP. ISEP no necesita conocer desde donde se hace la conexión, ya que ISEP puede compartir VISIR con Deusto y Deusto compartirlo con otras instituciones.

- Cualquier estudiante (puede acceder a cualquiera de los dos equipos VISIR para una configuración particular disponible en los dos equipos VISIR. Por ejemplo, si 90 estudiantes estuvieran intentando utilizar el sistema, 60 podrían estar utilizando un sistema VISIR y los otros 30 el otro sistema VISIR.

De hecho, en la situación propuesta en el ámbito del proyecto PILAR, donde hay 5 universidades que alojan los sistemas VISIR las compartirían de la forma descrita, sería posible soportar 5 configuraciones diferentes con 60 usuarios cada una, o 3 configuraciones diferentes con hasta 120 usuarios cada una, o incluso una única configuración con 360 usuarios.

Además de los mecanismos anteriores que están principalmente orientados a facilitar el registro e identificación de los usuarios entre instituciones, en la Figura 4 se muestra el interfaz de la aplicación principal basada en Moodle que se ha desarrollado para esta primera aproximación de plataforma federada del proyecto PILAR.

Como se puede ver, el objetivo es crear un conjunto de prácticas de electrónica analógica a las que los usuarios puedan acceder con un usuario y contraseña específico proporcionado mediante registro previo en la web del proyecto PILAR.

Una vez que el usuario ha accedido, podrá realizar aquellas prácticas que desee, y siempre de una manera transparente a la instancia VISIR que está usando. Es decir, el usuario no deberá preocuparse de si está accediendo al VISIR de cualquiera de las 5 instituciones del consorcio VISIR que lo ponen sus laboratorios al servicio de la comunidad, ya que, gracias a las políticas de federación implementadas, el registro y autentificación en cada instancia es automático.

De este modo, los usuarios tienen un único punto de acceso a todas las instancias VISIR disponibles actualmente en el consorcio PILAR, teniendo por tanto todo el potencial y portafolio de circuitos y experimentos disponibles desde una única página web.

V. Conclusiones

El artículo aquí presentado contribuye a la contextualización tanto del proyecto PILAR como de la política de federación que puede marcar el futuro de la explotación de las diferentes instancias del laboratorio VISIR que actualmente existen en el mundo. La comunidad VISIR está haciendo grandes esfuerzos para tratar de aunar recursos y conocimientos. Pero no puede ser únicamente a través de una página web con enlaces a los diferentes laboratorios. Si y no: siendo una página web, debe permitir a los usuarios acceder de una manera sencilla, transparente y rápida a los recursos ofrecidos por la comunidad.

La primera aproximación aquí expuesta no trata de ser la solución a la federación de todas las instancias VISIR, pero sí el primer paso hacia ella, partiendo de una web basada en el sistema Moodle, en donde los usuarios se registran una sola vez y pueden acceder a todas las instancias de este laboratorio remoto. El valor añadido de emplear Moodle es que además permite agregar información didáctica e información de qué experimentos se pueden desarrollar sobre cada plataforma y cómo hacerlos.

Agradecicimientos

Este artículo ha sido escrito en el marco del proyecto ERASMUS+ PILAR (2016-1-ES01-KA203-025327) liderado por UNED en España financiado dentro de ERASMUS+ (561735-EPP-1-2015-1-PT-EPPKA2-CBHE-JP)..

References

[1] J. Rodriguez-Andina, L. Gomes, and S. Bogosyan. "Current Trends in Industrial Electronics Education", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 10, pp. 3245-3252, 2010.

[2] Using Remote Labs in Education: Two Little Ducks in Remote Experimentation. Editors: Javier Garcia- Zubia (Universidad de Deusto) and Gustavo R. Alves (Polytechnic of Porto). Universidad de Deusto, Bilbao, 2011. 22 chapters. 465 pp. ISBN 978-84-9830-335-3.

[3] O. Naef. Real Laboratory, virtual laboratory or remote laboratory: what is the most ef-fective way?. *Intl. Journal of Online Engineering*, Vol 2, No.3. (2006).

[4] Z. Nedic, J. Machotka, and A. Nafalski: Remote laboratories versus virtual and real laboratories, 34th *ASEE/IEEE frontiers in education conference*, session T3E-1, pp.1-6. November 2003.

[5] A. Coble, A. Smallbone, A. Bhave, R. Watson, A. Braumann, and M. Kraft. Deliver-ing authentic experiences for engineering students and professionals through e-labs. *IEEE EDUCON*. pp 1085 – 1090. (2010).

[6] L. Gomes and S. Bogosyan. "Current Trends in Remote Laboratories", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 12, pp. 4744-4756, 2009

[7] D. Zutin, M. Auer, "Work in progress-Integrating educational online lab platforms around the iLab Shared Architecture" in Frontiers in Education Conference (FIE), 20ll (IEEE, 20ll).

[8] P. Orduna, J. lrurzun, L. Rodriguez-Gil, J. Garcia-Zubia, F. Gazzola, and D. Lopez-de Ipifia, "Adding new features to new and existing remote experiments through their integration in weblabdeusto," International Journal of Online Engineering (iJOE), vol. 7, no. S2, pp. pp-33, 2011.

[9] P. Orduña, L. Rodriguez-Gil, D. López-de-Ipiña and J. García-Zubia, "Sharing the remote laboratories among different institutions: A practical case," 2012 9th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), Bilbao, 2012, pp. 1-4.

[10] V. J. Harward, et aI., 'The ilab shared architecture: A web services infrastructure to build communities of internet accessible laboratories," Proceedings of the IEEE, vol. 96, no. 6, pp. 931- 950, 2008.

[11] Felix Garcia-Loro, et al.,. "Work in Progress: Experimenting in PILAR Federation: a Common Path for the Future", EDUCON 2018, 17-20 April, 2018, Santa Cruz de Tenerife, Canary Islands, Spain.

[12] N. Lima et al., "The VISIR+ project-helping contextualize math in an engineering course," 2017 4th Experiment@International Conference (exp.at'17), Faro, 2017, pp. 7-12.

Resultados de la implantación de la metodología PBL en la asignatura de Grado Electrónica General

M. Fuentes,
Dpto. Ing. Electrónica y Automática
Universidad de Jaén
Jaén, España
mfuentes@ujaen.es

M. Vivar
Dpto. Ing. Electrónica y Automática
Universidad de Jaén
Jaén, España
mvivar@ujaen.es

***Abstract*—La asignatura Electrónica General es la última electrónica analógica en los grados de Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación e Ingeniería Telemática. El volumen de materia de los descriptores, muy amplio para los créditos asignados, junto a la falta de continuidad de asignaturas de electrónica en cuatrimestres posteriores, hacía que la mayoría de los alumnos percibieran la asignatura como un escollo más que como una oportunidad de completar su formación, desembocando en malos resultados. Por esa razón se han ido implementado cambios que han fomentado el interés de los alumnos dando lugar a la mejora de los resultados académicos. La metodología viró hacia la implementación de un Project Based Learning y ha ido evolucionando a un Problem Based Learning. Se muestra la evolución y experiencia positiva durante la realización de dicha tarea.**

Keywords— Metodología docente, Problemas reales, PBL

I. INTRODUCCIÓN

El Aprendizaje Basado en Problemas (ABP), o PBL (*Problem-Based Learning*) en su acrónimo anglosajón, plantea la solución de problemas en la enseñanza como una aplicación del método científico. Parten de un problema, discuten hipótesis como alternativas de solución y pasan a la verificación y nuevos planteamientos. Pero el método ideado en la Universidad de McMaster (*Canadá*) entre la década de los 60 y comienzos del 70 es algo diferente, muy estructurado, que se inicia con la construcción de un problema complejo similar a los que el futuro profesional enfrentará en el ejercicio de su práctica cotidiana y en torno a cuya solución los estudiantes deben formarse en la teoría y en la práctica. Dicha propuesta lleva implícita el método científico.

El PBL es un método didáctico, apoyado en el dominio de las pedagogías activas, concretamente en las estrategias de enseñanza denominadas aprendizaje por descubrimiento y construcción, que se contraponen a la estrategia expositiva o magistral. Mientras que en ésta última el docente es el gran protagonista del proceso enseñanza-aprendizaje, en la de aprendizaje por descubrimiento y construcción es el estudiante quien se apropia del proceso, busca la información, la selecciona, organiza e intenta resolver con ella los problemas planteados. El docente es un orientador, expone problemas, sugiere fuentes de información y colabora con las necesidades del alumno. Los objetivos de esta estrategia son el desarrollo de habilidades del pensamiento, la activación de los procesos cognitivos en el estudiante y la transferencia de metodologías de acción intelectual [1].

En el PBL se crea un ambiente de aprendizaje en el que el problema dirige dicho aprendizaje. Por ello debe presentarse de tal manera que el estudiante entienda que debe profundizar ciertos temas antes de poder resolver el problema en cuestión. Los problemas que se utilizan para promover el aprendizaje deben ser progresivamente **abiertos** para que el estudiante agudice su habilidad de búsqueda. También hay problemas **estructurados** en los cuales se señala lo que el estudiante debe hacer para resolver adecuadamente el problema, aconsejables para estudiantes de los primeros niveles.

El problema debe mantener la motivación de los estudiantes y llevarlos a indagar áreas básicas de la profesión que estudian. Pero un problema en la cultura investigativa son muchas cosas: comprender un fenómeno complejo, resolver una incógnita, encontrar la mejor manera de hacer algo, hacerse una pregunta o plantearse un propósito, comprender en su complejidad un fenómeno natural o social, etc. El planteamiento de un buen problema debe considerar tres variables [2]:

Relevancia. Los estudiantes deben comprender la importancia del problema para discutir y aprender temas específicos del curso o nivel concreto en que se encuentran matriculados, así como para el ejercicio de su profesión. Deberían sentirse en una situación similar a la que tendrán que afrontar durante el ejercicio profesional.

Cobertura. El problema guíe a los estudiantes a buscar, descubrir y analizar la información que el curso o tema objeto de estudio debe entregarles. El docente debe identificar el tema central por enseñar, para entrar a formular un problema que, sin lugar a dudas conduzca o guíe a los estudiantes a buscar, estudiar y aplicar dicha temática.

Complejidad. El problema complejo no tiene una solución única, sino que demanda ensayar varias hipótesis, que deben documentarse y probarse. Además el problema complejo

demanda la participación de varias áreas de conocimiento antes de ser resuelto, configurando la interdisciplinariedad.

En la Universidad de Jaén, los grados en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación e Ingeniería Telemática incluyen asignaturas del área de Tecnología Electrónica para las que los alumnos muestran especial reserva en su seguimiento. Esta dificultad está generada por diversos aspectos, como el volumen de la materia en relación con el número de créditos o las ideas preconcebidas que poseen los alumnos al respecto. En este último sentido, la electrónica en los grados citados no es percibida por los alumnos como parte importante de su formación, y menos de las especialidades que pueden elegir posteriormente.

En el caso de Electrónica General, concebida desde un principio (en 2011 se instauran los Grados) con un equilibrio entre teoría y práctica (50%-50%), intentando hacerla atractiva a los alumnos, no tuvo los resultados esperados, por lo que se intentaron seguir los conceptos de universidades europeas de formación continua y aprender realizando [3] para hacerla atractiva a los alumnos, pero los resultados no fueron positivos. Se intentó un nuevo cambio, adaptando una metodología de aprendizaje basada en proyectos (cada proyecto intentaba incluir un módulo de la asignatura) incluyendo prácticas de diseño más complejas que recogiesen la mayoría de los conceptos que incluye la asignatura. Después de la buena acogida que tuvieron [4] se ha evolucionado hacia una metodología de aprendizaje basada en problemas cuyos resultados se muestran en este artículo, aunque es una metodología que requiere una continua revisión y evolución.

II. Escenario Docente

Antes de cursar la asignatura Electrónica General, su base teórico-práctica previa se ha adquirido en las asignaturas de primer curso Señales y Circuitos (primer cuatrimestre) y Electrónica de Dispositivos (segundo cuatrimestre). Hay que destacar que es necesario abarcar un gran volumen de contenidos para que los alumnos perciban el interés y utilidad de esta área, algo materialmente imposible en una asignatura que en el plan de estudios cuenta con únicamente 6 créditos, y además los alumnos sólo han cursado 9 créditos del área de Tecnología Electrónica previamente. Tampoco ayuda interpretar las ampliar competencias que tiene asignada esta asignatura (Tabla 1), que no la convierte en una Electrónica General al uso. El número de alumnos matriculados ha ido disminuyendo con los años, y se ha pasado de una media de 70 alumnos en los 4 primeros años a unos 45 en los 3 últimos. Este descenso se ha visto influenciado tanto por la reducción del número de matrículas de los Grados en la Escuela en general, como por el aumento de las tasas de alumnos que han superado la asignatura gracias a los cambios en la metodología.

II.A *Metodología inicial*

El primer curso docente (2011-2012) que se ofreció la materia en ambos Grados, se elaboró una guía docente que dividió la teoría y la práctica en partes iguales. Se intentaba explicar cada parte teórica y consolidarla en el laboratorio. Para que los alumnos intuyeran las conexiones con los circuitos electrónicos comerciales se realizaban doce sesiones prácticas, de las cuales un mínimo de 4 eran problemas de diseño sencillos. Después de haber trabajado con prácticas que asentaban los conocimientos previamente adquiridos en teoría, otras prácticas de diseño intentaban implicar y motivar al alumno para darle la posibilidad de ahondar en la asignatura. En dichas prácticas de diseño tenían que trabajar con adaptación de sensores, control de tiempos, electrónica de potencia, energía solar o filtrado analógico de señales. Esas prácticas de diseño voluntarias se premiaban con la posibilidad de superar la parte práctica de la materia.

TABLA 1. Competencias de la asignatura Electrónica General.

Competencias Generales Básicas	
CB.4	Poder transmitir información, ideas, problemas y soluciones a un público tanto especializado como no especializado.
Competencias Generales	
CG.3	Conocimiento de materias básicas y tecnologías, que le capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y tecnologías, así como que le dote de una gran versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
CG.9	Capacidad de trabajar en un grupo multidisciplinar y en un entorno multilingüe y de comunicar, tanto por escrito como de forma oral, conocimientos, procedimientos, resultados e ideas relacionadas con las telecomunicaciones y la electrónica.
Competencia Materias de Formación Básica	
CBB.4 **CGB.4**	Comprensión y dominio de los conceptos básicos de sistemas lineales y las funciones y transformadas relacionadas, teoría de circuitos eléctricos, circuitos electrónicos, principio físico de los semiconductores y familias lógicas, dispositivos electrónicos y fotónicos, tecnología de materiales y su aplicación para la resolución de problemas propios de la ingeniería.
Competencia Materias de Formación Común	
C.11	Capacidad de utilizar distintas fuentes de energía y en especial la solar fotovoltaica y térmica, así como los fundamentos de la electrotécnica y de la electrónica de potencia.

Los alumnos no tenían la costumbre de resolver problemas en el laboratorio, a lo que se sumaba el hecho de que no tenían asimilada la formación previa ni la recientemente adquirida. Su experiencia anterior en laboratorio se reducía a montar circuitos en la 'protoboard', alimentarlos adecuadamente y medir ciertas señales gracias a los aparatos presentes en el laboratorio. Otro problema fue la falta de homogeneidad a la hora de impartir los temarios y el nivel de exigencia al alumnado en las asignaturas previas, que demandó mejor coordinación con los profesores, pero las mejoras no fueron reseñables.

Por ello se comenzó a investigar con profundidad en distintas estrategias docentes que permitiesen cambiar la tendencia. Los primeros resultados y estrategias se presentaron en 2016 [4].

II.B. *Evolución de la metodología*

Basándose en las competencias CBB4-CGB4 y C11 junto con las necesidades futuras de los alumnos en asignaturas

relacionadas, se definieron 5 módulos docentes por afinidades tal y como se aprecia en la Tabla 2. Cada año se ha repartido y ajustado el tiempo, a la vez que se ha ido consolidando un esqueleto que sirve de hilo conductor para los alumnos con un perfil alejado del meramente electrónico. Progresivamente, se ha hecho inciso en aquellas energías renovables susceptibles de realizar prácticas en el laboratorio o en la nueva terraza del centro (inaugurado en el curso 2015-2016), con el objetivo de acercar dichas materias a los alumnos.

Tabla 2. Programa teórico de la asignatura Electrónica General.

TEORÍA		
Módulos	**Contenidos**	27 horas
Módulo I	**AO, Realimentación, Circuitos no lineales y Osciladores, Adaptación de sensores**	
	Tema 1: El amplificador operacional real	2 horas
	Tema 2: Realimentación. Circuitos no Lineales. Osciladores	4 horas
	Tema 3: Acondicionadores de señal. Usos del amplificador operacional	2 horas
Módulo II	**Respuesta en frecuencia. Filtros activos**	
	Tema 4: Respuesta en frecuencia	2 horas
	Tema 5: Filtros activos	2 horas
Módulo III	**Fuentes de alimentación lineales, Dispositivos de electrónica de Potencia**	
	Tema 6: Fuentes de alimentación lineales	4 horas
	Tema 7: Dispositivos de electrónica de potencia	4 horas
Módulo IV	**Energías renovables**	
	Tema 8: Sostenibilidad. EE.RR.. Panorama Energético Actual	2 horas
	Tema 9: Energía Solar. Energía Fotovoltaica. Sistemas FV autónomos	3 horas
Módulo V	**Fundamentos de electrotecnia y máquinas eléctricas**	
	Tema 10: Fundamentos de electrotecnia. Máquinas eléctricas	2 horas

De esta forma se ha ido cambiando la metodología, utilizando el aprendizaje basado en proyectos (*Project Based Learning*, PBL) [4] hacia un aprendizaje basado en problemas (*Problems Based Learning*, PBL) [5]. El aprendizaje basado en proyectos aplica los conocimientos y habilidades ya adquiridos a una situación práctica, por ejemplo realizar un diseño (proyecto) relacionado con una parte de la materia ya impartida. El aprendizaje basado en problemas implica el trabajo conjunto de los estudiantes, organizados en pequeños grupos, hacia la comprensión de un problema de la vida real con múltiples soluciones posibles. Su secuencia didáctica potencia el desarrollo de las competencias que se desean favorecer en los estudiantes en los distintos momentos del proceso. Por ejemplo, resolver un problema electrónico real, que se asienta en gran parte de los conocimientos que se imparten. Se puede adaptar como filosofía de la enseñanza, o como una estrategia didáctica para trabajar determinados contenidos y potenciar diversas habilidades [6]. La secuencia del aprendizaje basado en problemas no varía como muestra la figura 1.

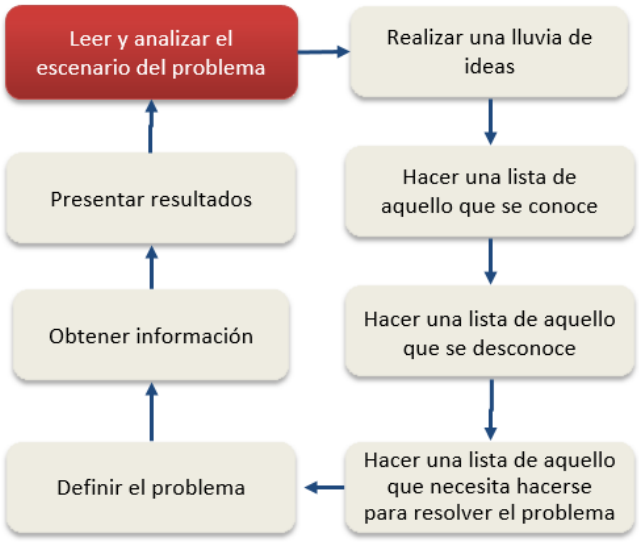


Fig. 1: Secuencia de aprendizaje basado en problemas (P. Morales, V.Landa) [6].

Para aplicar un PBL, la propuesta debe orientarse hacia la extensión y complementación de los conocimientos teóricos y prácticos adquiridos a lo largo de toda la asignatura. En el caso práctico se pretende que el estudiante aporte sus propias ideas sobre la resolución del trabajo. En nuestro caso, la intención es que estos trabajos puedan cubrir los conocimientos teóricos y prácticos fundamentales, apoyándose en las prácticas de laboratorio, clases magistrales, seminarios, conferencias, tutorías y cualquier actividad encaminada al aprendizaje de las capacidades de la asignatura, introduciendo el PBL de forma gradual en determinados contenidos. Las propuestas han partido del profesorado (relacionado en ocasiones con proyectos I+D), pero se está abierto a adaptar propuestas procedentes de los alumnos.

III. Análisis de los resultados previos

El análisis de la asignatura Electrónica General realizado ha seguido un diagrama de flujo descrito por J. Etxaniz [7] y puesto al día en la figura 2, persiguiendo la optimización de la calidad docente. A pesar de obtener unos resultados no satisfactorios con el número de alumnos que superaban la

asignatura los primeros años, en los resultados de las encuestas de opinión del alumnado sobre la actuación docente del profesorado realizadas anualmente, no destacó ningún apartado de manera negativa. No obstante, es llamativo que la valoración global iba reduciéndose de manera paulatina desde los 4,53 del primer curso 2011-12 a los 3,33 del curso 2013-14. A partir del curso 2014-2015, donde se comenzó a aplicar la nueva metodología, sigue una tendencia ascendente con 3,94, 4,07 y 4,44 del curso 2016-17 (última fecha con datos), mientras que los datos de la tasa de éxito y rendimiento han aumentado paulatinamente, como se observa en la fig. 3.

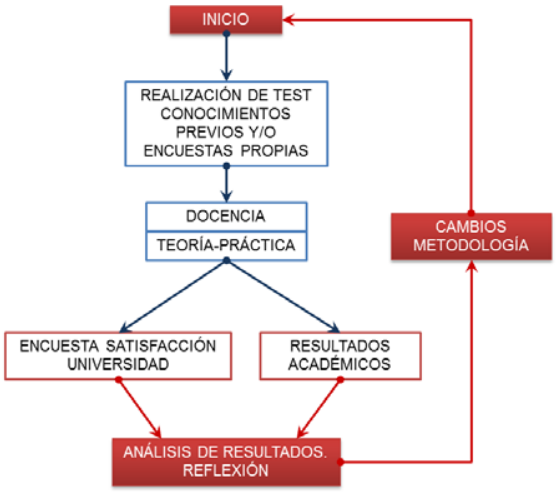


Fig. 2: Diagrama de flujo de la mejora docente seguida.

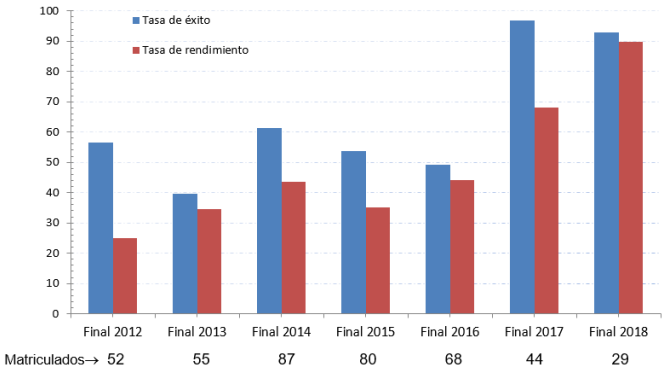


Fig. 3: Grafica de la evolución de la tasa de éxito (aprobados respecto a presentados) y tasa de rendimiento (aprobados respecto a matriculados) desde el comenzó de la asignatura en los nuevos grados curso a curso (%).

A partir del análisis de los resultados, comentados en [4] y apoyados por encuestas propias al inicio y finalización del cuatrimestre, se decidió ir un paso más allá y comenzar la implantación desde el curso 2014-15 de un aprendizaje basado en proyectos que está evolucionando a un aprendizaje basado en problemas.

IV. Metodología de Aprendizaje Basado en Problemas

Con los conceptos de PBL y el programa teórico de la asignatura se intentó asentar los conocimientos en un primer lugar y sobre esta base realizar un aprendizaje efectivo. Con este enfoque, los temas de teoría comienzan mostrando dispositivos reales que se descomponen en partes relacionadas con los objetivos y conceptos que se exponen en cada módulo teórico, haciendo inciso a los alumnos en la posibilidad de realizar su aprendizaje por dos caminos distintos para implantar la metodología gradualmente. En el primero se realiza una evaluación semanal de las prácticas, donde se facilitan todos los guiones de las 12 sesiones prácticas a realizar, tanto las prácticas base como las de diseño. Con ello obtienen su calificación final de prácticas. A ello se sumará la evaluación teórica mediante un examen para superar la asignatura completa.

El otro camino no tiene examen teórico. Basado en completar un diseño global propuesto (5 opciones), incluye las competencias que deben adquirirse en la asignatura. Dichos diseños globales se exponen al alumnado que decide que opción tomar y realizar así los grupos de prácticas. De esta manera se realizan 7 prácticas básicas obligatorias y 5 sesiones para desarrollar el diseño global elegido. La evaluación también se realiza semanalmente para comprobar el trabajo y evolución de los estudiantes. Finalmente tiene lugar la exposición pública del resultado (Tabla 3).

Tabla 3. Programa práctico de la asignatura Electrónica General

PRÁCTICAS		
Módulos	**Sesiones**	27 horas
Módulo I	AO, Circuitos no lineales y osciladores, Adaptación de sensores	10 horas
	Práctica 0: Resolución de problemas con AO. Toma de contacto con el laboratorio	
	Práctica 1: Características del AO real	
	Práctica 2: Realimentación positiva. Osciladores	
	Práctica 3: Acondicionadores de señal	
	Práctica 4: Diseños de usos del AO	
Módulo II	Respuesta en frecuencia y filtros activos	4 horas
	Práctica 5: Respuesta en frecuencia de filtros de primer orden	
	Práctica 6:Respuesta en frecuencia de filtros de segundo orden	
Módulo III	Fuentes de alimentación lineales, Dispositivos de electrónica de Potencia	8 horas
	Práctica 7: Fuentes de alimentación lineales	
	Práctica 8: Diseño de fuentes	
	Práctica 9: Electrónica de potencia	
	Práctica 10: Diseño de potencia	

Módulo IV	Energías renovables	4 horas
	Práctica 11: Radiación solar. Análisis de un SFA bajo sol real	
	Práctica 12: Diseño de un SFA. Comparativa con software específico	
Diseños	Organización Diseño final	1 hora

Durante las primeras semanas tiene lugar la composición de los grupos de prácticas, donde se intenta separar los grupos por afinidades. También se ha intentado que las sesiones prácticas tengan un número reducido de alumnos para que la realización de las mismas sea más fluida y el profesor pueda dedicar más tiempo a cada grupo. En estas semanas tienen lugar seminarios de problemas y de prácticas para recordar y afianzar conceptos adquiridos en asignaturas anteriores. Por último, se utilizan 8 horas para la realización de seminarios específicos de seguimiento y una conferencia de un profesional acreditado. Se utilizan las tutorías colectivas para resolver dudas y problemas en función de la realimentación recibida por el docente desde la clase.

A. Programa de prácticas desarrollado

El programa de prácticas desarrollado cuenta, por tanto, con dos itinerarios hasta la total implantación de PBL:

- Evaluación continua de prácticas, donde el alumno elige realizar 12 sesiones prácticas, 7 básicas y 5 de diseño, y un examen teórico.
- PBL (*Problem Based Learning*) donde el alumno realiza 7 prácticas básicas guiadas y 5 sesiones dedicadas al desarrollo del diseño.

El objetivo del diseño de la práctica global es adquirir la mayoría de las competencias de la asignatura y alcanzar los resultados de aprendizaje. Todas tienen en común la alimentación mediante energías renovables, gestión eficiente de la potencia, acondicionamiento de señal y su correspondiente interfaz de usuario. Además, los alumnos muestran el resultado y su funcionamiento en sesión pública mediante una presentación elaborada para tal fin, donde se evalúan las dotes de transmitir información, ideas y soluciones a una audiencia. Así las prácticas globales propuestas en el curso 2017-2018 son las siguientes:

- Diseño de una incubadora de bajo coste y consumo con control de temperatura.
- Diseño de un turbidímetro de bajo coste para desinfección solar (SODIS).
- Diseño de un circuito de carreras para coches fotovoltaicos.
- Diseño de un bombeo fotovoltaico a escala.
- Diseño de un sistema de potabilización de agua a partir de SODIS.

Además de las 12 sesiones prácticas, tiene lugar una sesión de toma de contacto que se ha implantado los últimos cursos (se ha denominado Práctica 0), para refrescar y asentar conocimientos adquiridos en asignaturas anteriores vinculadas con la electrónica.

En general, la dinámica de las tutorías colectivas ha sido muy variable en función de la actitud de los alumnos, aunque el profesorado también intenta inculcarles curiosidad por los temas trabajados de modo que sean lo más activos posibles en esta faceta. Así, una parte de las tutorías colectivas asociadas al diseño de sistemas fotovoltaicos se desarrolla en las instalaciones que existen en la Escuela, para que puedan practicar en primera persona con el equipamiento, fomentando el aprendizaje de los conceptos básicos (figura 4). Las tutorías colectivas deberían convertirse en una herramienta de gran utilidad para los estudiantes al permitir resolver dudas de forma global con la participación de todos ellos en clase. No hay que olvidar que la mayoría de las dudas que se plantean son prácticamente idénticas y, por tanto, se optimizaría de forma notable el tiempo invertido en resolverlas. Por ello, se intentan ubicar temporalmente al finalizar los bloques importantes de la asignatura.

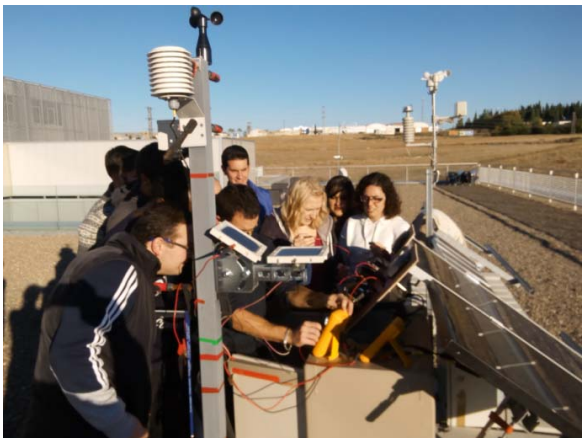


Fig. 4: Desarrollo de una sesión práctica en la terraza del centro, manejando distintos conceptos de los Sistemas Fotovoltaicos Autónomos.

B. Evaluación

Se intenta realizar una evaluación útil, cuyo objetivo no sea sólo la calificación del alumno, sino que sirva también al profesor para analizar el desarrollo de la asignatura. Se dan las dos opciones de evaluación hasta la total implantación del PBL.

- Evaluación continua, semanal, con el desarrollo de prácticas guiadas (7 sesiones) y un diseño global (5 sesiones). La ponderación sería 5% de la participación, 45% de las prácticas guiadas y 50% al diseño global.
- Evaluación semanal de prácticas obligatorias (12 sesiones) acompañado de un examen teórico final. 5% participación, 45% prácticas, 50% examen.

En el curso pasado (2016-2017), sólo dos personas de los 44 matriculados escogieron la evaluación tradicional y en el curso actual, 2017-2018, todos los alumnos eligieron la opción PBL, por lo que éste se considera implantado y no se dará la opción de evaluación tradicional para el siguiente curso. En las siguientes figuras (5-9) se presentan algunas fotografías de los prototipos realizados durante las sesiones de presentación.



Fig. 5: Detalle de la sesión de presentación de los trabajos realizados basados en las prácticas globales propuestas.



Fig. 6: Detalle de algunos de los circuitos de carreras para coches fotovoltaicos presentados.

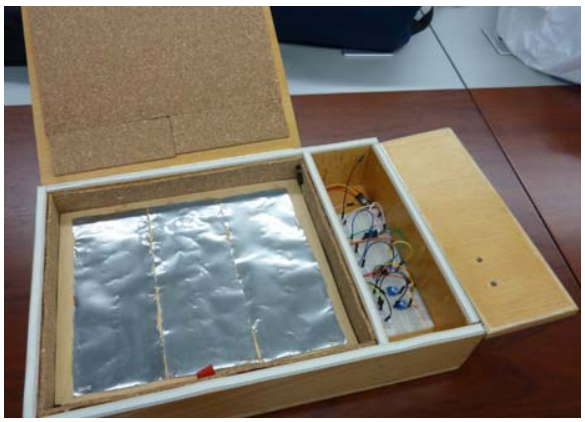


Fig. 7. Fotografía de una de las incubadoras de muestras realizadas.



Fig. 8. Fotografía de una de un diseño de turbidímetro de bajo coste.



Fig. 9. Detalles de algunos de los sistemas de riego fotovoltaico a escala expuestos.

V. Conclusiones

Los resultados docentes de implantación de la metodología PBL han sido muy positivos, tanto por los resultados obtenidos como por la motivación e implicación que han mostrado los alumnos en su aprendizaje, desembocando en un interés posterior para mejorar los diseños.

Así, con el seguimiento anual realizado a través de encuestas propias, de la Universidad, de las tasas de éxito (aprobados/presentados) y las tasas de rendimiento (aprobados/matriculados), se ha observado un incremento considerable de los resultados: las tasas van mejorando y consolidando año tras año; y las encuestas elaboradas por la Universidad también muestran unas cifras más positivas.

El esfuerzo por parte de los docentes es mayor, exigiendo un seguimiento y coordinación continuas, pero merece la pena, ya que si se consigue la motivación e implicación de los alumnos los trabajos presentados van más allá de cumplir los requisitos básicos mostrando soluciones que mejoran los diseños iniciales. La presentación del trabajo ante los compañeros también fomenta la transmisión de las ideas ante un público y los motiva para conseguir los objetivos de los diseños propuestos.

Los diseños globales se han pensado para cubrir la mayor parte de las competencias de la asignatura, siendo dinámicas, ya que se intenta aprender de su implantación para mejorarlas o cambiarlas por otras que fomenten el aprendizaje. Así, se ha intentado utilizar dispositivos fotovoltaicos para la alimentación de los diseños, que intentan enlazar con las necesidades domésticas e industriales a las que un futuro ingeniero de telecomunicación se enfrentará.

Por lo general, este tipo de herramientas no se aconsejan tradicionalmente en situaciones de masificación, orientándose hacia cursos superiores y asignaturas optativas que tienen menor número de alumnos. Pero esto debería evitarse, proponiendo el uso de este tipo de herramientas, ya que este tipo de trabajos fomenta el espíritu de trabajo en equipo y la coordinación en su desarrollo, adaptando el grado de dificultad al interés del alumno, aun cuando exija un mayor esfuerzo al profesorado cuando son asignaturas de primeros cursos con mayor número de matriculados. En el caso que nos ocupa, en el último curso 2017-18 todos los alumnos se han decantado por la opción PBL, por lo que la experiencia de implantación de esta metodología de aprendizaje se considera un éxito.

Referencias

[1] B. Restrego. Aprendizaje basado en problemas: una innovación didáctica para la enseñanza universitaria. Educación y Educadores, 8, 9-19 (2005).

[2] M. Albanese, S. Mitchell. Problem-based learning: A review of the literature, its outcomes and implementation issues, 1993. Academic Medicine, 68(1), 52-81.

[3] B. Suárez, “La sociedad del conocimiento: una revolución en marcha” Jornadas REBUN 2003. http://documents.mx/documents/espacio-europeo-de-educacion-superior-la-sociedad-del-conocimiento-una-revolucion-en-marcha-benjamin-suarez-arroyo-vicerrector-de-ordenacion-academica-.html (último acceso 3/3/2018)

[4] M.Fuentes, M. Vivar, C. Rus. “Experiencias de mejor docente de asignaturas obligatorias de grado: Electrónica General”. XII Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica, Sevilla, 11-13 Junio 2016.

[5] L. Prieto Navarro. *Aprendizaje activo en el aula universitaria: El caso del aprendizaje basado en problemas*. Miscelánea Comillas, UPC (2006) Vol. 64, 124 pp.173-196. http://revistas.upcomillas.es/index.php/miscelaneacomillas/article/view/6558/6367 (último acceso: 26/2/18).

[6] P. Morales, V. Landa. *Aprendizaje basado en problemas*. Theoria Universidad del Bío-Bío, Chillan, Chile (2004) Vol.13, pp. 145-157. http://didac.unizar.es/jlbernal/ensenar_en_la_Universidad/pdf/13_2ABP.pdf (último acceso 14/2/2018)

[7] J. Etxaniz, F. Hernando “Electrónica General, ¿mejoras reales en la metodología docente?” XI Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica, Bilbao, 11-13 Junio 2014

Ejemplo de éxito en la implantación de una metodología PBL: de asignatura de Grado a TFG

M. Fuentes,
Dpto. Ing. Electrónica y Automática
Universidad de Jaén
Jaén, España
mfuentes@ujaen.es

M. Vivar
Dpto. Ing. Electrónica y Automática
Universidad de Jaén
Jaén, España
mvivar@ujaen.es

***Abstract*—La asignatura Electrónica General es la última electrónica analógica en los grados de Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación e Ingeniería Telemática. A pesar de su volumen de materia, la falta de continuidad de asignaturas de electrónica en cuatrimestres posteriores y los malos resultados académicos que cosechaba, desde la implantación progresiva de una metodología PBL los alumnos han ido mostrando interés creciente hasta el hecho de realizar su trabajo fin de grado (TFG) con las temáticas propuestas en dicha asignatura de grado de segundo curso. Concretamente, aquí se presentan trabajos de dos tipos: uno sobre un diseño de un circuito para carreras de coches fotovoltaicos y otro sobre una incubadora de muestras microbiológicas. Ambas eran propuestas de la metodología PBL que se han mejorado y desarrollado hasta adquirir una entidad de TFG que se han presentado con buena calificación.**

Keywords— Metodología docente, Problemas reales, PBL, TFG

I. INTRODUCCIÓN

En la Universidad de Jaén, los grados en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación e Ingeniería Telemática incluyen asignaturas del área de Tecnología Electrónica para las que los alumnos muestran especial reserva en su seguimiento. Esta dificultad está generada por diversos aspectos, cómo el volumen de la materia en relación con el número de créditos o las ideas preconcebidas que poseen los alumnos al respecto. En este último sentido, la electrónica en los grados citados no es percibida por los alumnos como parte importante de su formación, y menos de las especialidades que pueden elegir posteriormente.

En el caso de Electrónica General, a pesar de ser concebida desde un principio (en 2011 se instauran los Grados) con un equilibrio entre teoría y práctica (50%-50%), intentando hacerla atractiva a los alumnos, no se obtuvieron los resultados esperados. Por ello se intentó seguir los conceptos de universidades europeas de formación continua, donde el planteamiento general de las competencias básicas es el aprender a aprender, de las competencias transversales el aprender a convivir y a ser y de las competencias específicas el aprender a hacer [1]. Con ello se intentó hacerla atractiva a los alumnos, pero los resultados no fueron positivos. Se fomentó mejorar la situación mediante la implementación de nuevos cambios, adaptando una metodología de aprendizaje basada en proyectos, que se basaba en prácticas de diseño más complejas que perseguían recoger la mayoría de los conceptos que incluye la asignatura. Después de la buena acogida que tuvieron [2] se ha evolucionado hacia una metodología de aprendizaje basada en problemas (PBL), donde se plantea un diseño global que intenta incluir todos las competencias y módulos de la asignatura que anteriormente estaban divididos en varios diseños específicos acorde a cada competencia. Los resultados han sido muy positivos (mostrados en [3]), aunque es una metodología que requiere una continua revisión y evolución.

Inicialmente se dio la opción de cursar la asignatura mediante dos caminos. En el primero se realiza una evaluación semanal de las prácticas, donde se facilitan todos los guiones de las 12 sesiones prácticas a realizar, tanto las prácticas básicas como las dedicadas a pequeños diseños. Con ello se obtiene su calificación final de prácticas. A ello se suma la evaluación teórica mediante un examen para superar la asignatura completa. El otro camino no tiene examen teórico y está basado en completar uno de los diseños globales propuestos (opción del PBL), que incluye las competencias que deben adquirirse en la asignatura. Dichos diseños globales se exponen al alumnado al principio de curso y ellos deciden que opción tomar, formando así los grupos de prácticas. De esta manera se realizan 7 prácticas básicas obligatorias y 5 sesiones para desarrollar el diseño global elegido. La evaluación también se realiza semanalmente para comprobar el trabajo y evolución de los estudiantes. La evaluación semanal también incluye una supervisión y guiado del trabajo realizado para fomentar la implicación del estudiante. Finalmente tiene lugar la exposición pública del resultado donde se valora el grado de consecución de los objetivos iniciales. Hay que destacar que en el último curso 2017-18 todos los alumnos han escogido el camino del PBL.

En la opción de cursar la asignatura mediante un PBL, se ha trabajado en problemas que sean lo más parecidos a los que se pueden encontrar en el mundo real, llamándolos ‘diseños globales’ de manera que también puedan cubrir las

competencias de la asignatura, que se muestran en la Tabla 1, múltiples y variadas, ya que contienen tanto las generales y básicas, como las relacionadas con la electrónica, o las específicas que tratan sobre fuentes de energía, renovables y electrotecnia.

Estos diseños globales han ido evolucionando y ajustándose para hacerlos lo más completos posibles, de modo que además consigan aumentar la motivación e implicación del alumnado. Entre los propuestos han destacado dos que han sido los que más peticiones han recibido:

- Diseño de una incubadora de muestras microbiológicas con control de temperatura.
- Diseño de un circuito de carreras para coches fotovoltaicos.

De hecho, tras cursar la asignatura de Electrónica General de segundo curso del grado, varios alumnos solicitaron realizar su TFG con dicha idea, ampliándola y mejorándola al incorporar conceptos que quedaban fuera de las competencias de la asignatura, profundizando en los problemas propuestos. Esto ha permitido que el estudiante incremente su habilidad de búsqueda, indagando en áreas básicas de la profesión que estudian.

Este trabajo presenta los buenos resultados de la implantación de la metodología PBL en una asignatura obligatoria de segundo curso de Grado, Electrónica General, que es la última electrónica analógica que se estudia. Se presentan varias soluciones que los alumnos han dado a los diseños globales propuestos, mostrando el grado de implicación del alumnado, con algunos casos en los que incluso se ha continuado con los diseños globales hasta desarrollar TFG completos. Se muestra por tanto, un claro ejemplo de éxito de implantación de la metodología PBL en una asignatura que no es de especialidad de últimos años, sino todo lo contrario: una asignatura de segundo curso de carácter obligatorio.

TABLA 1. Competencias de la asignatura Electrónica General.

Competencias Generales Básicas	
CB.4	Poder transmitir información, ideas, problemas y soluciones a un público tanto especializado como no especializado.
Competencias Generales	
CG.3	Conocimiento de materias básicas y tecnologías, que le capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y tecnologías, así como que le dote de una gran versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
CG.9	Capacidad de trabajar en un grupo multidisciplinar y en un entorno multilingüe y de comunicar, tanto por escrito como de forma oral, conocimientos, procedimientos, resultados e ideas relacionadas con las telecomunicaciones y la electrónica.
Competencia Materias de Formación Básica	
CBB.4 **CGB.4**	Comprensión y dominio de los conceptos básicos de sistemas lineales y las funciones y transformadas relacionadas, teoría de circuitos eléctricos, circuitos electrónicos, principio físico de los semiconductores y familias lógicas, dispositivos electrónicos y fotónicos, tecnología de materiales y su aplicación para la resolución de problemas propios de la ingeniería.
Competencia Materias de Formación Común	
C.11	Capacidad de utilizar distintas fuentes de energía y en especial la solar fotovoltaica y térmica, así como los fundamentos de la electrotécnica y de la electrónica de potencia.

II. Implantación de la Metodología

El Aprendizaje Basado en Problemas (ABP), o PBL (*Problem-Based Learning*) en su acrónimo anglosajón, es un método didáctico, apoyado en el dominio de las pedagogías activas, concretamente en las estrategias de enseñanza denominadas **aprendizaje por descubrimiento y construcción**, que se contraponen a la estrategia expositiva o magistral. Mientras que en ésta última el docente es el gran protagonista del proceso enseñanza-aprendizaje, en la de aprendizaje por descubrimiento y construcción es el estudiante quien se apropia del proceso, busca la información, la selecciona, organiza e intenta resolver con ella los problemas planteados. El docente es un orientador, expone problemas, sugiere fuentes de información y colabora con las necesidades del alumno. Los objetivos de esta estrategia son el desarrollo de habilidades del pensamiento, la activación de los procesos cognitivos en el estudiante y la transferencia de metodologías de acción intelectual [4].

El PBL plantea la solución de problemas en la enseñanza como una aplicación del método científico. Parten de un problema, discuten hipótesis como alternativas de solución y pasan a la verificación y nuevos planteamientos. Pero el método ideado en la Universidad de McMaster (*Canadá*) entre la década de los 60 y comienzos del 70 es algo diferente, muy estructurado, que se inicia con la construcción de un problema complejo similar a los que el futuro profesional enfrentará en el ejercicio de su práctica cotidiana y en torno a cuya solución los estudiantes deben formarse en la teoría y en la práctica. Dicha propuesta lleva implícita el método científico [5].

En el PBL se crea un ambiente de aprendizaje en el que el problema dirige dicho aprendizaje. Por ello debe presentarse de tal manera que el estudiante entienda que **debe profundizar ciertos temas** antes de poder resolver el problema en cuestión. Los problemas que se utilizan para promover el aprendizaje deben ser progresivamente **abiertos** para que el estudiante agudice su habilidad de búsqueda. También hay problemas **estructurados** en los cuales se señala lo que el estudiante debe hacer para resolver adecuadamente el problema, aconsejables para estudiantes de los primeros niveles.

Con estas premisas se ha diseñado un PBL basado en completar un diseño global propuesto (inicialmente hay 5 distintos), incluyendo las competencias que deben adquirirse en la asignatura. Se pretende que el estudiante aporte sus propias ideas sobre la resolución del trabajo pudiendo cubrir los conocimientos teóricos y prácticos fundamentales, apoyándose en las prácticas de laboratorio, clases magistrales, seminarios, conferencias, tutorías y cualquier actividad encaminada al aprendizaje de las competencias de la asignatura.

Dichos diseños globales se exponen al alumnado para que decidan que opción tomar y realizar la composición de los

grupos de prácticas. De esta manera se realizan 7 prácticas básicas obligatorias (problemas estructurados) y 5 sesiones para desarrollar el diseño global elegido. La evaluación también se realiza semanalmente para comprobar el trabajo y evolución de los estudiantes. Finalmente tiene lugar la exposición pública del resultado. La calificación final tiene en cuenta la evaluación continua semanal, la exposición pública del resultado y la consecución de los objetivos (funcionamiento correcto, tipo de solución adoptada, mejoras al diseño) que figuraban en los enunciados de dichas prácticas globales. En la Tabla 2 se muestra el cronograma de desarrollo en el laboratorio.

Tabla 2. Programa práctico de la asignatura Electrónica General.

PRÁCTICAS		
Módulos	**Sesiones**	27 horas
Módulo I	Amplificadores Operacionales (AO), Circuitos no lineales y osciladores, Adaptación de sensores	10 horas
	Práctica 0: Resolución de problemas con AO. Toma de contacto con el laboratorio	
	Práctica 1: Características del AO real	
	Práctica 2: Realimentación positiva. Osciladores	
	Práctica 3: Acondicionadores de señal	
	Práctica 4: Diseños de usos del AO	
Módulo II	Respuesta en frecuencia y filtros activos	4 horas
	Práctica 5: Respuesta en frecuencia de filtros de primer orden	
	Práctica 6:Respuesta en frecuencia de filtros de segundo orden. Diseño	
Módulo III	Fuentes de alimentación lineales, Dispositivos de electrónica de Potencia	8 horas
	Práctica 7: Fuentes de alimentación lineales	
	Práctica 8: Diseño de fuentes	
	Práctica 9: Electrónica de potencia	
	Práctica 10: Diseño de potencia	
Módulo IV	Energías renovables	4 horas
	Práctica 11: Radiación solar. Análisis de un SFA bajo sol real	
	Práctica 12: Diseño de un SFA. Comparativa con software específico	
Diseños	Organización Diseño final	1 hora

Durante las primeras semanas se componen los grupos de prácticas, donde se separan los grupos por afinidades. Se intenta que los grupos tengan un número reducido de alumnos para que la realización de las prácticas sea más fluido y el profesor pueda dedicar más tiempo a cada grupo. En estas semanas iniciales se realizan seminarios de problemas y prácticas para recordar y afianzar conceptos adquiridos en asignaturas anteriores. A lo largo del curso se dedican 8 horas para la realización de seminarios específicos de seguimiento y una conferencia de un profesional acreditado. Las tutorías colectivas resuelven dudas y problemas en función de la realimentación recibida por el docente desde la clase.

Con esta concepción se evolucionó la metodología docente de la asignatura Electrónica General desde sus comienzos, dando opciones a los estudiantes para elegir dos caminos para cursar la asignatura: la tradicional y la PBL. En el curso 2016-17 únicamente dos alumnos tomaron la opción tradicional y en el último curso 2017-18 todos los alumnos eligieron la opción PBL con unas tasas de éxito y rendimiento crecientes que superaron el 80% en dicho curso.

III. Diseños Globales

El objetivo del diseño global es adquirir la mayoría de las competencias de la asignatura y alcanzar los resultados de aprendizaje. En su elaboración se ha intentado que tengan los siguientes requisitos: elaborar el módulo de alimentación y la gestión eficiente de la potencia (módulo III) utilizando energías renovables (módulo IV), acondicionamiento de señal, elección de actuadores, gestión temporal y su correspondiente interfaz de usuario (módulo I y II). Además, los alumnos tienen que mostrar el resultado y su funcionamiento en sesión pública mediante una presentación elaborada para tal fin, donde se evalúan las dotes de transmitir información, ideas y soluciones a una audiencia. Los diseños globales propuestos en el curso 2017-2018 han sido los siguientes:

- Diseño de una incubadora de muestras microbiológicas con control de temperatura.
- Diseño de un turbidímetro de bajo coste para análisis de la calidad del agua.
- Diseño de un circuito de carreras para coches fotovoltaicos.
- Diseño de un bombeo fotovoltaico a escala.
- Diseño de un sistema de potabilización de agua a partir de la tecnología de desinfección solar (SODIS).

Los diseños que más demanda han tenido en los últimos cursos han sido los basados en dos conceptos: ‘circuitos de carreras para coches fotovoltaicos’ e ‘incubadora de muestras microbiológica’, que han ido evolucionando y adaptándose año tras año. Además, varios alumnos han solicitado realizar su TFG a partir de sus diseños globales de la asignatura. Por ello, a continuación, se muestran los enunciados de dichos diseños y los trabajos presentados en el grado.

III.A *Enunciado Diseño Incubadora de Muestras*

Con motivo de la unión de esfuerzos para paliar los problemas derivados de la ingesta de agua no potable de

comunidades en vías de desarrollo es necesario realizar una serie de análisis microbiológicos del agua que compruebe su estado. En este proceso, una parte muy importante es contar con estufas o incubadoras que mantienen las muestras a una temperatura constante durante un tiempo determinado. Las estufas de laboratorio son unos elementos caros y voluminosos, mientras que en la mayoría de las ocasiones sólo es necesario un espacio para albergar un número reducido de muestras. Cada muestra se guarda en una placa denominada 'placa de Petri o Petri dish' (figura 1). Son circulares, estándares de un diámetro de 55 mm y altura 14 mm. Durante el proceso de incubación deben estar en total oscuridad.

En este trabajo se pide diseñar una incubadora que pueda albergar un número mínimo de 20 muestras (Petri-dishes). Para ello habrá que adquirir o realizar un recipiente cuyo tamaño y material sea óptimo para soportar temperaturas entre 35ºC y 45ºC sin sufrir deformación, contando con un buen aislamiento térmico. El tamaño máximo del contenedor no debe superar un volumen de 10 dm^3.

El diseño electrónico consistirá en controlar un elemento calefactor ***uniformemente*** *en el recipiente elegido, vigilando que todas las Petri-dishes estén a la misma temperatura ± 1ºC. Los sensores de temperatura aportarán realimentación para que la temperatura se mantenga siempre constante: cambios por apertura o cierre del recipiente, de temperatura ambiente o en el volumen de muestras. El bajo coste y consumo serán dos objetivos fundamentales.*

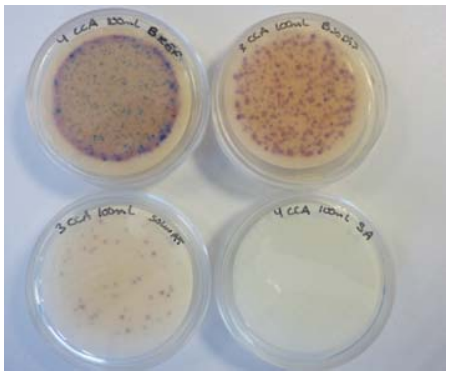


Fig. 1. Ejemplo de muestras microbiológicas contenidas en Petri-dishes.

Consejos a seguir en el diseño:

- *Calcular el espacio necesario en función de la distribución que se quiera y buscar el recipiente del material más adecuado, atenuando las pérdidas térmicas sin perder la relación calidad-precio.*
- *Buscar el elemento calefactor que proporcione la temperatura deseada. Pensar su ubicación en el recipiente para la distribución uniforme del calor (se puede usar ventilación) sin perder el objetivo de bajo consumo.*
- *Encontrar el sensor de temperatura adecuado y distribuir varios en el interior del recipiente elegido.*
- *Elegir el interfaz de usuario más adecuado: botones, leds, potenciómetros, etc. Debe mostrar la indicación de proceso en marcha y proceso finalizado. También se puede mostrar la temperatura con un display.*
- *El usuario puede fijar dos temperaturas de funcionamiento: 36ºC o 44ºC y el sistema debe mantener dicha temperatura constante ± 1ºC.*
- *Gestionar la temperatura del sensor y la deseada para controlar el elemento calefactor en todo momento.*
- *Todo el sistema tendrá una única alimentación continua de 12V. La idea es alimentarlo con un Sistema Fotovoltaico Autónomo, por lo que se tendrá en cuenta para las conexiones y la integración de la batería y el regulador si fuese factible.*

Para presentar la práctica es necesario que funcione correctamente. Se utilizará material analógico relacionado con la asignatura y justificado en la memoria. La sencillez premiará el diseño. Utilizar las hojas de características de los componentes para comprobar que cumplen las especificaciones del diseño, pero no se adjuntarán a la memoria, sólo sus enlaces web. Diseños idénticos se considerarán plagio y no puntuarán. Se entregará una memoria en el caso de que funcione correctamente, con una explicación clara de la solución adoptada junto con las figuras y esquemas que los diseñadores crean necesarias para la comprensión y manejo del circuito (manual). Se presentarán los cálculos del SFA en función del consumo y emplazamiento elegido. Adjuntar presupuesto de los materiales empleados.

Pautas de realización:

- *Comenzar buscando y eligiendo (por orden): recipiente, elemento calefactor, sensores e interfaz.*
- *Trabajar con el diseño electrónico: acondicionamiento de señal, temporización y control de actuadores.*
- *Es necesario tener un boceto del diseño y de los principales elementos electrónicos adquiridos para poder discutir los posibles problemas/soluciones.*

A partir de estas premisas básicas se presentaron numerosas soluciones. En cuanto a los recipientes, unas se basaban en soluciones comerciales (neveras portátiles, casi siempre) cuyo aislamiento se mejoró con planchas de poliestireno, mientras que otras decidieron fabricarlas y aislarlas de forma manual. La mayor parte de las veces el elemento calefactor estaba constituido por resistencias de potencia y en ocasiones iban acompañadas de pequeños ventiladores para unificar las temperaturas. Respecto a los sensores analógicos empleados, en la mayoría de las ocasiones se decantaron por sensores de temperatura activos y resistivos en menor número de ocasiones. La adaptación de la señal se realizó con amplificadores operacionales y también se utilizaron comparadores de histéresis para evitar el 'repiqueteo' de la conexión del elemento calefactor y tener varios grados centígrados para ajustar la inercia del calentamiento del elemento calefactor y el enfriamiento del recipiente cuando éste deja de funcionar. En la temporización se utilizaron osciladores del tipo 555 y como interfaz primaron los botones y

los diodos led, aunque algún diseño utilizó displays de voltímetros de bajo coste. A continuación se muestran varias fotografías con los resultados más relevantes (figuras 2-5).

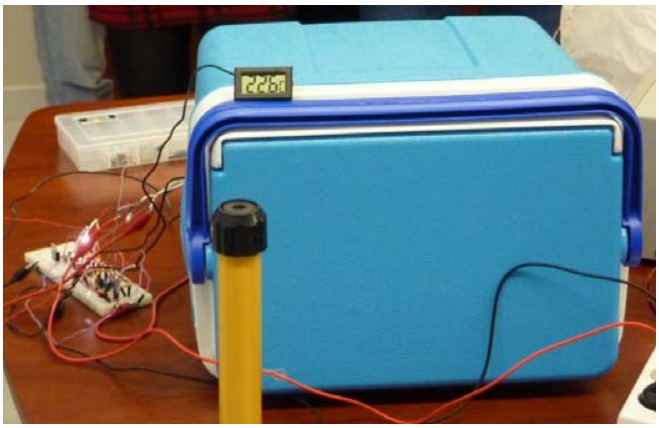


Fig. 2. Diseño Global de la Incubadora de muestras. Prototipo basado en una nevera portátil comercial con mejora de aislamiento e interfaz con display.

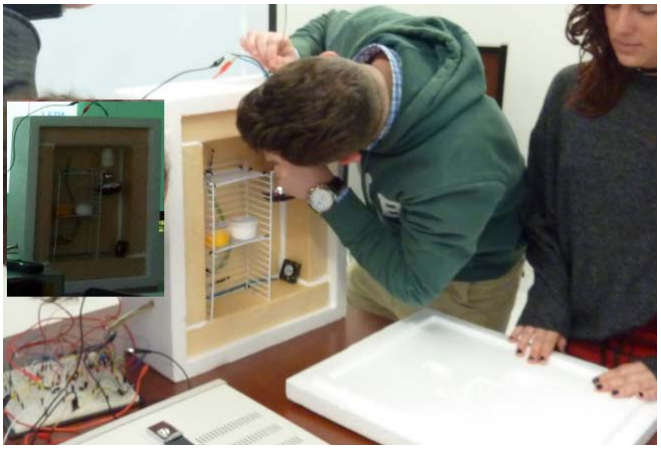


Fig. 3. Diseño Global de la Incubadora de muestras. Prototipo basado en una nevera portátil comercial con mejora de aislamiento, y ventilación forzada.



Fig. 4. Diseño Global de la Incubadora de muestras. Prototipo basado en un diseño propio con mejora de aislamiento, elemento calefactor basado en resistencias de potencia e interfaz con botones y diodos leds.

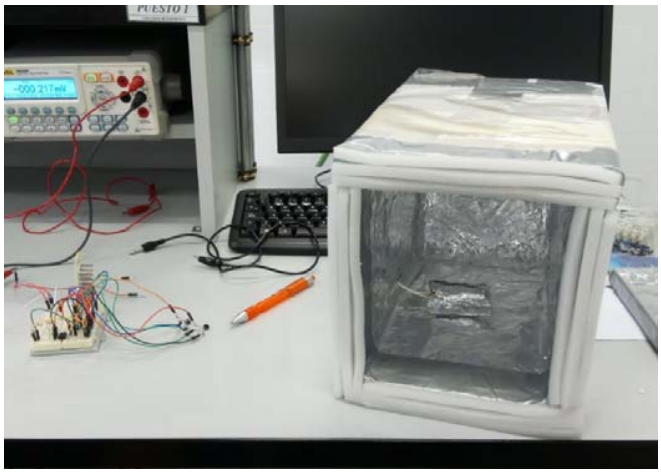


Fig. 5. Diseño Global de la Incubadora de muestras. Desarrollo de un prototipo basado en un diseño propio con mejora de aislamiento, elemento calefactor basado en resistencias de potencia e interfaz con botones y diodos leds

A. Enunciado Diseño Circuito de Carreras.

Se desea diseñar un juego para niños que quiere fomentar los conceptos de la energía solar. Para ello se ha pensado construir una pista con materiales de bajo coste que permita situar un mínimo de dos a un máximo de cuatro coches impulsados con energía solar fotovoltaica para ver cuál de ellos llega antes a la meta, partiendo del mismo punto. Es necesario que haya separación en las pistas para que no se produzcan invasiones d del carril. El diseño debe contar con semáforos en la salida que señalen cuando se puede comenzar la carrera (cambiando de rojo a verde), una barrera móvil que impida su salida hasta que el semáforo esté en verde, y señales lumínicas (Leds, displays, etc.), al final de la pista que indiquen que coche llegó el primero sin género de dudas. Cuando termine la carrera debe volverse a posición inicial para utilizar de nuevo el circuito.

Para ello se ha pensado en situar un sensor en la línea de meta que active una señal luminosa en el carril cuyo automóvil llegue primero desactivando el resto de señales para que no haya confusión. Hay que tener en cuenta que las carreras se pueden hacer bajo luz solar o artificial (foco muy potente), por lo que habrá que ajustar bien la luminosidad de las señales empleadas y la sensibilidad de los sensores. Se valorarán ampliaciones al diseño, como indicadores intermedios (para ver la evolución de cada coche), orden de llegada, muestra de tiempos, diseño de circuitos en curva, etc. El bajo coste y consumo serán dos objetivos fundamentales.

Consejos a seguir en el diseño:

- *Diseñar el circuito teniendo en cuenta la anchura de los coches, el tipo de sensores y las señales indicadoras a utilizar, intentando no dar sombra sobre las pistas. Hacer pruebas con los coches fotovoltaicos adquiridos para comprobar que su desplazamiento y detección es correcta. El manejo de la barrera móvil debe ser automático en su accionamiento. Cuidar la relación calidad-precio.*
- *Buscar o diseñar el elemento sensor que indicará la llegada del primer coche a la meta. Pensar en su*

implementación y el circuito de control para que la longitud del cableado no sea excesivo.

- *Todo el sistema tendrá una única alimentación continua de 12V. La idea es alimentarlo con un Sistema Fotovoltaico Autónomo, por lo que se tendrá en cuenta para las conexiones y la integración de la batería y el regulador, si fuese factible.*

Para presentar la práctica es necesario que funcione correctamente. Se utilizará material analógico relacionado con la asignatura y justificado en la memoria. La sencillez premiará el diseño. Utilizar las hojas de características de los componentes para comprobar que cumplen las especificaciones del diseño, pero no se adjuntarán a la memoria, sólo sus enlaces web. Diseños idénticos se considerarán plagio y no puntuarán. Se entregará una memoria en el caso de que funcione correctamente, con una explicación clara de la solución adoptada junto con las figuras y esquemas que los diseñadores crean necesarias para la comprensión y manejo del circuito (manual). Se presentarán los cálculos del SFA en función del consumo y emplazamiento elegido. Adjuntar presupuesto de los materiales empleados.

Pautas de realización:

- *Comenzar buscando y eligiendo (por orden): coches, sensores de detección, tipo de pista e interfaz.*
- *Trabajar con el diseño electrónico: acondicionamiento de señal, temporización y control de actuadores.*
- *Es necesario tener un boceto del diseño y de los principales elementos electrónicos adquiridos para poder discutir los posibles problemas/soluciones*

A partir de las premisas básicas expuestas en el enunciado se presentaron numerosas soluciones. Todos los circuitos fueron de creación propia. Unos fueron para carreras dragster (línea recta), otros ovales y otros en forma de ocho, que son los que más complejidad ofrecían. Las barreras se manejaron con pequeños motores tanto de continua como paso a paso. Unas barreras móviles se elevaban y otras se ocultaban bajo el suelo. En cuanto al material del circuito, los había de marquetería, cartón e incluso material reciclado. La parte de sensado recayó, casi en su totalidad, en detectores de infrarrojos intentando que sus longitudes de onda que no se viesen muy afectadas por el espectro solar. La adaptación de señal se realizó con amplificadores operacionales y la temporización se basó en osciladores del tipo 555. El interfaz usual fue realizado con leds y pulsadores. En cuanto a los coches fotovoltaicos utilizados, algunos de ellos tuvieron que sufrir modificaciones para que el paso por curva no tuviese problemas. A continuación se muestran varias fotografías con los resultados más relevantes (figuras 6-8).

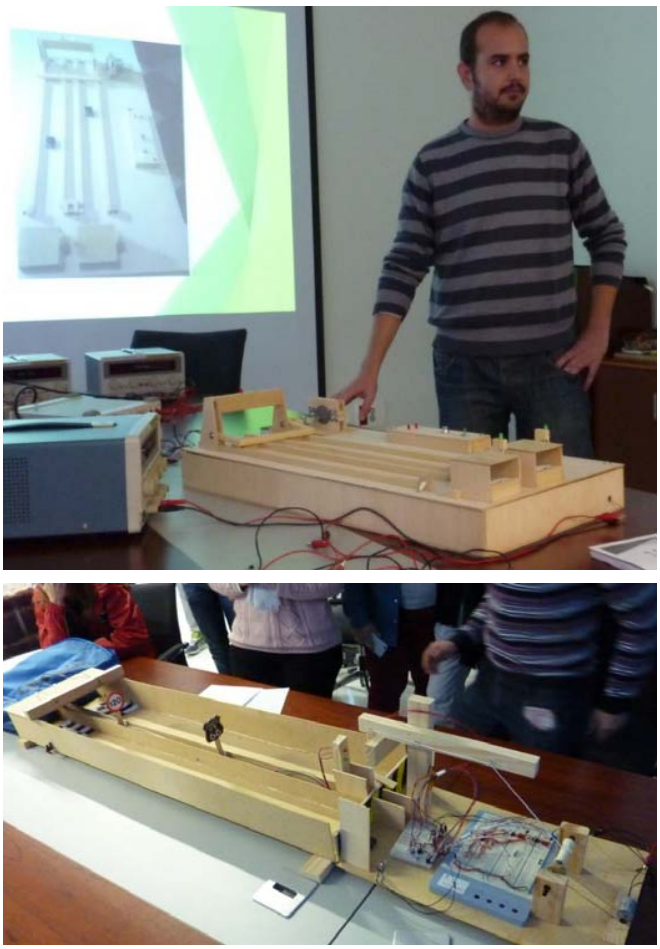


Fig. 6. Diseño Global del Circuito. Circuitos dragsters elaborados con marquetería. El primero (parte superior) recoge todas las funciones exigidas y además tiene oculta la parte electrónica. Cuenta con un botón de reset y puesta en marcha para los casos en los cuales los coches no completen la carrera. Ambos tienen un cajón de llegada sombreado para evitar que los coches siguiesen funcionando.

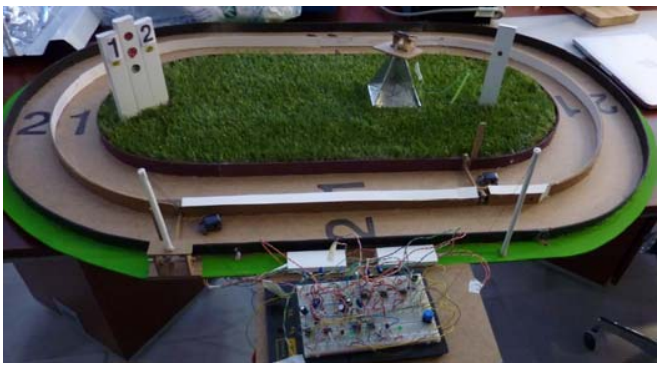
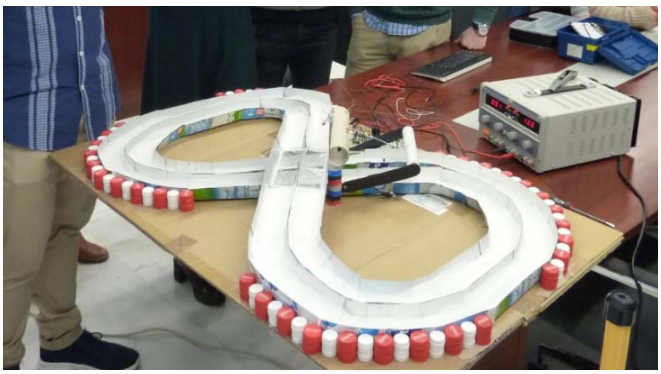
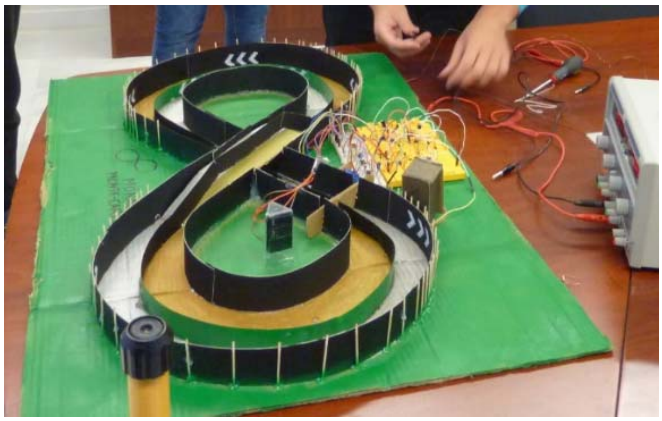


Fig. 7. Diseño Global del Circuito. Circuito oval que contaba con un sensor solar para indicar si las condiciones eran óptimas para la carrera.





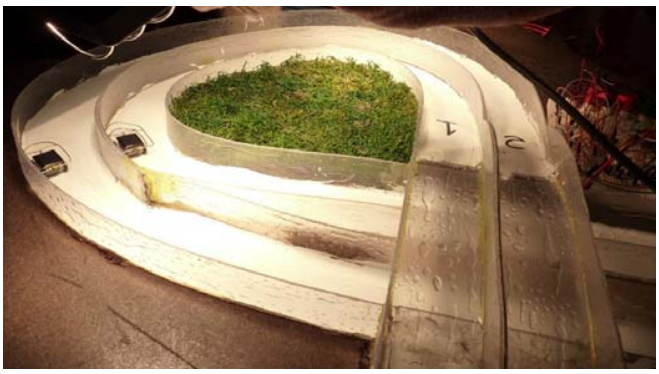




Fig. 8. Diseño Global del Circuito. Circuitos en ocho. El primero (parte superior) está realizado con elementos reciclados (tapones, tetrabrik, cartón) con un puente de material transparente para atenuar las sombras en el cruce. En el tercer caso se observa como además de utilizar material transparente para el cruce, los coches están modificados para que su paso por curva no ofrezca problemas. Además, la barrera se oculta en la parte inferior del circuito.

IV. Trabajos Fin de Grado.

A partir de los diseños globales expuestos varios alumnos solicitaron realizar sus trabajos fin de grado (TFG) en dichos diseños con las mejoras oportunas para dotarlos de entidad. En el caso del circuito de carreras para coches fotovoltaicos, se realizó un estudio sobre el aspecto socio-cultural del juego, acompañado de encuestas de los usuarios (el prototipo se utilizó en las jornadas de divulgación científica de la EPS de Linares) y se trabajó el diseño electrónico para que pudiese funcionar de forma totalmente analógica o digital, permitiendo en ese caso obtener toda la información en la pantalla de un ordenador gracias al uso de la plataforma Arduino enviando la información vía web. El TFG se presentó y obtuvo la máxima calificación. En la figura 9 se aprecia el diseño final.

En el caso de la incubadora de muestras se están siguiendo dos caminos en cuanto al recipiente elegido. Uno aboga por el uso de un contenedor comercial modificado para mejorar el aislamiento térmico y el otro parte de un diseño propio. En ambos casos se están utilizando plataformas de software y hardware libre, varios sensores de temperatura para asegurarse que la temperatura es uniforme dentro del recipiente, un display con botones como interfaz de usuario y diferentes algoritmos para gestionar la producción de calor del elemento calefactor buscando siempre el mínimo consumo y el máximo rendimiento térmico ya que la alimentación en los países en vías de desarrollo se realizará con un sistema fotovoltaico autónomo cuya batería y regulador se pretende que estén integrados en la estructura. Estos proyectos están avanzados, pero todavía no se han presentado. Se muestran en la figuras 10 y 11 el desarrollo de los prototipos.



Fig. 9. TFG basado en el diseño de un circuito de carreras de coches fotovoltaicos. Realizado en marquetería, con la electrónica oculta en su interior, tiene la posibilidad de funcionamiento autónomo analógico o digital con envío de información de las carreras vía web.



Fig. 10. TFG basado en el diseño de una incubadora de muestras microbiológicas de bajo coste. Se apuesta por un diseño propio de marquetería y poliestireno para un aislamiento térmico optimizado.

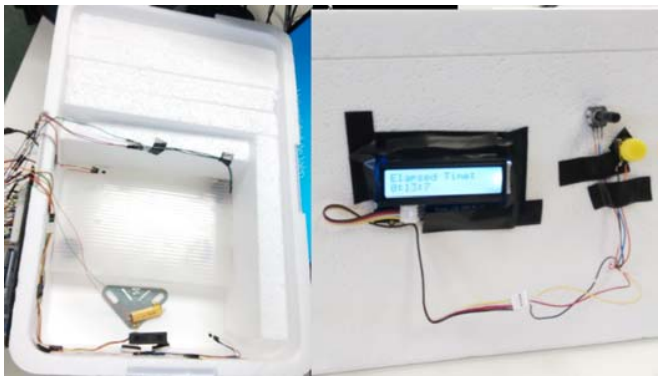


Fig. 11. TFG basado en el diseño de una incubadora de muestras microbiológicas de bajo coste. Se parte de la modificación de una nevera comercial en la que se aloja la circuitería electrónica y se mejora el aislamiento térmico.

V. Conclusiones

La evolución de la metodología de aprendizaje de la asignatura Electrónica General hasta implantar un aprendizaje basado en problemas ha sido muy positivo. Ha exigido un esfuerzo por parte de los docentes, pero la respuesta del alumnado ha merecido la pena. En el caso que nos ocupa, en el último curso 2017-18 todos los alumnos se han decantado por la opción PBL, por lo que la experiencia de implantación de esta metodología de aprendizaje se considera un éxito.

Sin duda, una buena elección de los diseños globales, que además de cubrir la mayor parte de las competencias de la asignatura, intenten motivar al estudiante es fundamental. Por ello, año tras año se analizan los resultados obtenidos y se proponen nuevos diseños, otros se retiran y otros se modifican paliando los defectos encontrados. Hay que destacar que la utilización de dispositivos fotovoltaicos para la alimentación de los diseños, que intentan enlazar con las necesidades domésticas e industriales a las que un futuro ingeniero de telecomunicación se enfrentará, ha tenido buena acogida.

Desde un punto de vista objetivo, las cifras que se obtienen del seguimiento anual realizado a través de encuestas propias realizadas por la Universidad, de las tasas de éxito (aprobados / presentados) y las tasas de rendimiento (aprobados / matriculados), muestran un incremento considerable de los resultados: las tasas van mejorando y consolidando año tras año [3].

Desde un punto de vista más subjetivo la implicación y motivación de los alumnos ha sido fundamental. La envergadura de los diseños presentados muestra el tiempo y dedicación que le han dedicado a los problemas, como se ha mostrado en este artículo y se aprecia en las fotografías. Además varios de los alumnos han pedido continuar con el diseño, mejorándolo, para dotarle de entidad de TFG, a pesar de que la asignatura les parecía tangencial al comienzo y de que todavía les quedan muchas asignaturas de Grado por cursar. Aunque este tipo de herramientas se aconsejan tradicionalmente en cursos superiores y asignaturas optativas, bajo la experiencia vivida, debería aplicarse también en asignaturas de cursos inferiores, ya que este tipo de trabajos fomenta el espíritu de trabajo en equipo y la coordinación en su desarrollo, adaptando el grado de dificultad al interés del alumno, aun cuando exija un mayor esfuerzo al profesorado.

Referencias

[1] B. Suárez, “La sociedad del conocimiento: una revolución en marcha” Jornadas REBUN 2003. http://documents.mx/documents/espacio-europeo-de-educacion-superior-la-sociedad-del-conocimiento-una-revolucion-en-marcha-benjamin-suarez-arroyo-vicerrector-de-ordenacion-academica-.html (último acceso 3/3/2018)

[2] M.Fuentes, M. Vivar, C. Rus. “Experiencias de mejor docente de asignaturas obligatorias de grado: Electrónica General”. XII Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica, Sevilla, 11-13 Junio 2016.

[3] M.Fuentes, M. Vivar. “Resultados de la implantación de la metodología PBL en la asignatura de grado Electrónica General”. XIII Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica, Tenerife, 20-22 Junio 2018.

[4] B. Restrego. Aprendizaje basado en problemas: una innovación didáctica para la enseñanza universitaria. Educación y Educadores, 8, 9-19 (2005).

[5] H.S. Barrows, “Problem-Based Learning in medicine and beyond: A brief overview. New Directions for Theaching and Learnig, pp. 3-12 (1996).

Docencia por iguales en prácticas de electrónica y su efecto sobre la motivación

Peña Fabiani Bendicho
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de la Laguna
La Laguna, España
mfabiani@ull.edu.es

Sara González Pérez
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de la Laguna
La Laguna, España
sgonzal@ull.edu.es

Carlos Efrén Mora
Departamento de Ingeniería Agraria, Náutica, Civil y Marina
Universidad de la Laguna
La Laguna, España
carmora@ull.edu.es

***Abstract*—En este trabajo se muestra cómo la docencia práctica de materias tecnológicas puede enriquecerse involucrando a los alumnos en las propias labores docentes. Se explora docencia colaborativa basada en labores de tutorización de prácticas de electrónica en ingeniería, realizadas por iguales y se analiza si con este tipo de experiencias aumenta la motivación, tanto de los alumnos tutorizados como de los tutores, al mismo tiempo que mejora sus competencias**

Keywords—Motivación, Modelo MUSIC, Enseñanza Colaborativa. Educación en Ingeniería

I. INTRODUCCION

Uno de los principales retos de la educación universitaria actual es formar a los estudiantes no sólo en conocimientos sino en las competencias que van a necesitar en el ejercicio de su profesión. Cuestiones como la capacidad de liderazgo, organización y comunicación son esenciales en la formación de los futuros ingenieros [1]. La forma de introducir y valorar dichas competencias es una cuestión de gran relevancia actualmente.

Por otro lado, a la hora de implementar los curriculum y guías docentes, la motivación es un aspecto importante a considerar si se quieren mejorar la eficiencia y con ello los resultados obtenidos por los alumnos, tanto en contenidos como en aptitudes. El modelo MUSIC ("eMpowerment, Usefulness, Success, Interest, and Caring") [2] permite analizar los distintos aspectos que influyen en la motivación de los alumnos y se puede utilizar en cualquier área temática para diseñar estrategias que motiven a los estudiantes o para analizar las fortalezas y debilidades una determinada innovación docente y su efecto sobre la motivación del alumnado. Este modelo proporciona así mismo parámetros cuantitativos ampliamente validados que permiten evaluar y comparar el efecto de nuevas innovaciones educativas [3]

El involucrar a los propios alumnos en labores docentes (cooperación entre iguales [4]) es algo ampliamente extendido en la docencia y sin embargo ha sido poco explotado en carreras técnicas. Se ha comprobado que tiene efectos positivos tanto en la docencia de Ingeniería Eléctrica [5] como Mecánica [6]. En este trabajo se explora este campo de actuación, introduciendo por primera vez la figura del alumno-tutor en una asignatura de electrónica e investigando qué tipo de efectos tiene dicha figura sobre la motivación tanto de los alumnos tutores como tutorizados.

II. MÉTODO DE TRABAJO

A. Metodología docente

La experiencia llevada a cabo consiste en el uso de dos métodos docentes diferentes. El primero se basa en un método tradicional, es decir, el profesor es el encargado de explicar las prácticas y de atender las dudas de los alumnos durante el desarrollo de las mismas. El segundo método incorpora como novedad la figura del tutor o tutores, representado por uno o varios alumnos de la asignatura, que se encargarán de realizar la labor del profesor en el laboratorio, explicando las prácticas y atendiendo las dudas que tengan sus compañeros a los largo de la realización de las mismas.

En esta experiencia la elección de los tutores se ha realizado con voluntarios. Los tutores están exentos de presentar un informe al finalizar la experiencia, pero tienen que realizar un guión de prácticas personalizado antes de la misma. Disponen de dos recursos para la preparación de las prácticas: los guiones explicativos, aportados por la profesora, y dos sesiones de laboratorio previas con la profesora. En estas sesiones extraordinarias, los tutores tienen la oportunidad de llevar a cabo las prácticas, paso a paso, y de preguntar todas las dudas que les surjan durante la realización y montaje de las mismas, así como durante la elaboración de los guiones personalizados.

B. Descripción del alumnado

La asignatura en la que se ha llevado a cabo esta experiencia es de segundo curso de Electrónica. En ella convergen alumnos de tres grados diferentes: grado en tecnologías marinas, grado en náutica y transporte marítimo y grado en ingeniería radio-electrónica naval (Fig 1). El número de alumnos matriculados durante el curso 2017/2018 es de 38, de los cuales sólo 25 han realizado las prácticas de laboratorio. El nivel de estudios del que provienen es en su mayoría de

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

bachillerato (77,8%) y en un porcentaje menor de formación profesional (16,7%) (Fig. 1). La mayor parte del alumnado se encuentra entre 20 y 22 años (Fig. 2) y sólo el 11% del total son mujeres. El número de estudiantes que han participado en la investigación es sin embaro demasiado pequeño para poder obtener conclusiones fiables respecto a las diferencias en motivación derivadas de estos parámetros, por lo que los análisis y resultados presentados en este artículo engloban a todos los participantes mencionados.

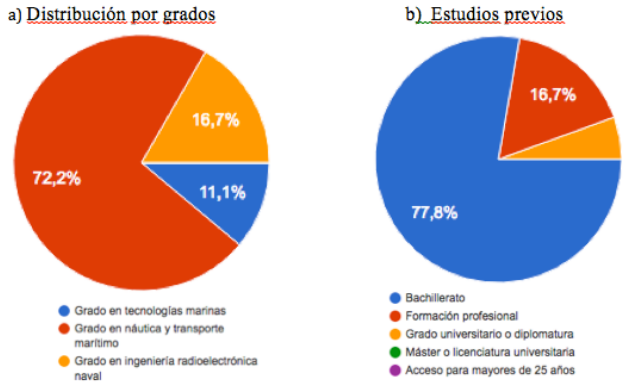


Fig. 1. Distribución de los estudiantes por titulación y nivel de estudios

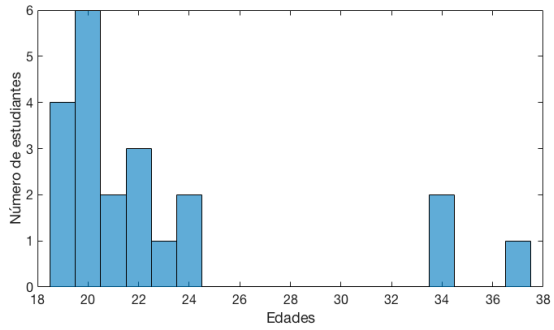


Fig. 2. Distribución de los estudiantes por edades

C. *Descripción de las prácticas.*

La asignatura "Electrotecnia y Electrónica" consta de un total de 6 créditos, de los cuales 1.5 son de prácticas de laboratorio. El peso de dichas prácticas en la evaluación total de la asignatura es de un 30%.

La parte experimental de esta asignatura consta de ocho prácticas de laboratorio, de las cuales seis se han realizado con el método tradicional y dos con el método de los tutores. La duración de cada una de estas prácticas es de dos horas.

El contenido de las primeras prácticas pretende que el alumno se familiarice con los componentes más habituales de los circuitos electrónicos (resistencias, bobinas, condensadores, diodos, circuitos integrados, etc.) y que aprenda a manejar los equipos de medida más utilizados en electrónica (fuentes de alimentación, multímetros, osciloscopios, etc.). Una vez adquirida cierta soltura en el manejo del instrumental, se comprueban experimental mente la teoría estudiada en clase (Ley de Ohm, Leyes de Kirchhoff, Teoremas de Thévenin y Norton, Teorema de Máxima transferencia de Potencia, etc.). Por último, se realizan diferentes montajes relacionados con aplicaciones electrónicas básicas como la regulación de tensión en un circuito, la polarización de un transistor amplificador o el diseño de amplificadores operacionales para realizar distintas operaciones matemáticas

En cada práctica, los alumnos deben llevar a cabo el montaje de los circuitos electrónicos especificados en los guiones correspondientes, tomar nota de las medidas experimentales obtenidas y sacar conclusiones, que luego tendrán que organizar/condensar en un informe de prácticas que se realiza en grupo, siguiendo la estructura de un artículo científico del IEEE [7] Sin embargo, en el caso de las dos prácticas realizadas con docencia colaborativa, el trabajo realizado por los tutores, cambia, tanto antes como después de las mismas. En primer lugar, deben estudiar el guion de prácticas con antelación/previamente de manera que controlen todos los aspectos teóricos y prácticos necesarios para explicarla al comienzo de cada sesión de prácticas y para poder resolver las dudas que expongan sus compañeros en el transcurso de la sesión correspondiente. Para comprobar que este trabajo previo es llevado a cabo por los tutores y comprobar que están preparados para su labor, éstos se reúnen con la profesora de la asignatura con una semana de antelación a la realización de las prácticas para recibir una tutoría de la misma y para realizar el montaje y la toma de datos de la práctica que hayan elegido para tutorizar. En segundo lugar, los tutores no tendrán que entregar el informe de prácticas, sino un nuevo guion de la práctica en cuestión, que habrán tenido que elaborar previamente para realizar su trabajo como tutores de las mismas, siguiendo el orden que ellos consideren más adecuado, claro e informativo.

D. *Modelo MUSIC de motivación.*

El modelo MUSIC de motivación [1] se puede utilizar tanto para analizar los exitos y desventajas de un método docente determinado, como para comparar dos métodos docentes distintos, tal y como se hace en este artículo.

Este modelo engloba cinco categorías de estrategias de enseñanza que garantizan cinco principios clave para motivar a los estudiantes [8]

- M: Sentirse empoderados ("eMpowerment"), con capacidad para la toma de decisiones sobre distintos aspectos de su aprendizaje: Autonomía [9]
- U: Entender que lo que están aprendiendo es útil ("Usefulness") para sus objetivos a corto o largo plazo: Utilidad [10]
- S: Creer que pueden tener éxito ("Success") si realizan el esfuerzo necesario: Expectativas de éxito [11]
- I: Estar interesados ("Interest") en el contenido y las actividades propuestas.: Interés situacional [12]

- C:Considerar que el entorno de aprendizaje (incluyendo el profesor) se preocupan por su formación y su crecimiento personal ("Caring"): Atención [13]

Estos cinco parámetros han de ser estudiados de modo independiente y se debe evitar cualquier tipo de "analisis global" que promedie los resultados obtenidos en cada uno de ellos.

III. RESULTADOS

Con el fin de evaluar el impacto que la docencia colaborativa mediante tutores tiene sobre los alumnos, se han analizado cuantitativamente los cinco componentes del modelo MUSIC (versión estudios superiores) [14] y se han recopilado las valoraciones cualitativas que tanto los alumnos como de los tutores y profesores realizan al comparar la experiencia obtenida con ambas metodologías.

A. Resultados cuantitativos

Para evaluar la experiencia realizada con cada uno de los métodos, se han elaborado dos cuestionarios MUSIC. En el primer cuestionario se evaluó la motivación tras las prácticas realizadas por el método tradicional con profesor, y en el segundo la motivación después de haber realizado las dos prácticas donde los propios alumnos ejercían de tutores.

Cada cuestionario consta de 26 preguntas, a las cuales se responde con una escala de cinco niveles (1=Total desacuerdo y 6=Totalmente de acuerdo). Dichas cuestiones se presentan de modo aleatorio para su respuesta, sin embargo han de ser agrupadas de forma adecuada para analizar de forma independiente aquellas respuestas que miden distintos aspectos de motivación. Con ello se obtiene una valoración de cada uno de los cinco aspectos de la motivación dados por el modelo.

Los cuestionarios han sido elaborados para garantizar que que la preguntas y escalas relacionadas con cada uno de los cinco componentes primarios del modelo de motivación MUSIC proporcionan puntuaciones válidas de los mismos Aunque se trata de un modelo ampliamente validado [15], hemos comprobado la consistencia de la escala de medida para cada componente usando el Alfa de Cronbach [16]. Para interpretar los valores obtenidos usaremos el criterio de Geroge y Mallery [17], según el cual valores por encima de .9 son excelentes, más de .8 se puede considerar bueno y por encima de .7 son aceptables.

TABLE I. ANÁLISIS DE FIABILIDAD. ALFA DE CRONBACH

Parámetros	*Con profesor*	*Con tutor-alumno*
M	.80	.98
U	.79	.91
S	.70	.93
I	.85	.98
C	.84	.89

Como podemos observar en la Tabla I, en todos los casos se obtienen valores de alfa superiores a .8, lo cual es suficiente para garantizar que la fiabilidad de la escala utilizada es buena e incluso en algún caso excelente. Se ha observado, así mismo, que la fiabilidad eliminando una de las cuestiones no aumenta significativamente, lo cual garantiza la consistencia del método.

Las puntuaciones obtenidas para las dos encuestas de motivación son muy altas para todos los tipos de prácticas (Fig. 2 y Fig. 3), pero se aprecia claramente un aumento de la motivación cuando son los propios alumnos los que ejercen como tutor, es decir, cuando se aplica docencia colaborativa.

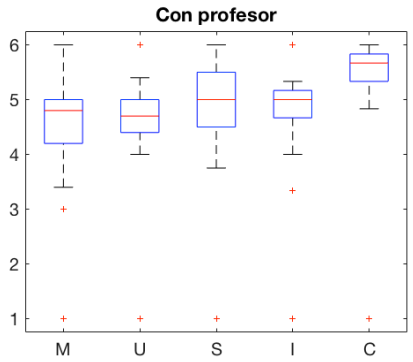


Fig. 3. Componentes MUSIC de las prácticas tutorizadas por el profesor (escala 1-6).

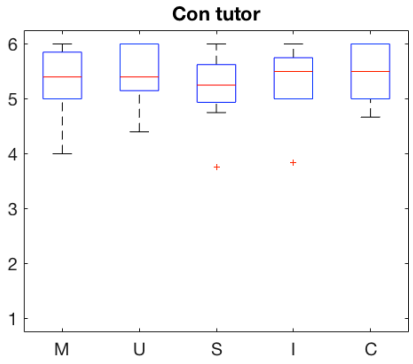


Fig. 4. Componentes MUSIC de las prácticas con tutor-alumno (escala 1-6).

Otro resultado interesante al comparar las dos figuras es que la dispersión en las respuestas disminuyó mucho al introducir la participación de los alumnos en la docencia, mediante la figura del tutor-alumno (ver también desviación típica en la Tabla II). Ello se debe, como podemos ver en la Tabla II a que en las prácticas realizadas sólo con profesor había alumnos con muy baja motivacion (valores en todos los parámetros de 1) mientras que en las prácticas con tutores todos los alumnos la dispersión de los datos se hace mucho menor.

TABLE II. DISPERSIÓN DE LOS RESULTADOS PARA LOS DOS MÉTODOS

Parámetros	*Mínimos*	*Máximos*	*Desviacióne s típica*
M	1/6	4,00/6	1,18 / 0,63
U	1/6	4,40/6	1,08 / 0,54
S	1/6	3,75/6	1,10 / 0,69
I	1/6	3,83/6	1,12 / 0,67
C	1/6	4,67/6	1,14 / 0,50

Finalmente, dado que el número de alumnos participantes en el estudio no es elevado (menor de 30) y que las encuestas eran anónimas, se ha aplicado el test estadístico t-Student para muestras independientes con varianzas desiguales, a fin de comparar las dos muestras y considerar si las medias obtenidas con los dos modelos docentes presentan diferencias estadísticamente significativas (Tabla III).

No obstante, dicho método sólo es totalmente fiable para distribuciones normales. Al tener menos de 50 medidas hemos elegido la prueba de Shapiro-Wilk para probar la normalidad de nuestros datos. Sólo para los parámetros M y U se ha corroborado la normalidad de la distribución (p=0.047 y 0.051 respectivamente), mientras que para el resto de los parámetros se descarta la hipótesis de normalidad al ser p menor del 1% (p=0.0033, 0.0044 y 0.0036). Por ello y a fin de corroborar nuestros resultados, se ha realizado un estudio no paramétrico mediante el test de Mann-Whitney, cuya interpretación es análoga a la del t-Student pero puede ser aplicado a distribuciones no normales. En la Tabla III se puede observar que las conclusiones obtenidas por ambos métodos son las mismas.

TABLE III. MEDIAS Y PARÁMETRO "P" CON T-STUDENT Y TEST DE MANN-WHITNEY

Parámetros	*Con profesor*	*Con tutor-alumno*	*p(t-student)*	*p (MW)*
M	4,52	5,29	0,019	0,0376
U	4,61	5,40	0,0089	0,0183
S	4,78	5,19	0,12	0,2624
I	4,73	5,28	0,055	0,1432
C	4,34	5,48	0,33	0,8552

Se puede ver que para los parámetros M y U tenemos p<0.05 por lo que se puede afirmar que en ellos existe una mejora significativa (con un error menor del 5%) al introducir docencia colaborativa del modo descrito en este artículo. La introducción de la figura del tutor-alumno mejora por tanto la sensación de empoderamiento y utilidad que tienen los alumnos al realizar las prácticas.

El único aspecto en el que la presencia de un alumno haciendo el papel de tutor claramente no mejora la motivación es en la apreciación que los alumnos tienen de haber recibido la atención adecuada (parámetro C), pues la hipótesis de semejanza en las medias puede ser aceptada con una precisión del 85%. Una posible interpretación es que el valor medio de dicho parámetro tenía ya una alta valoración cuando las prácticas se realizaban sólo con el profesor (ver Fig. 4), por lo que este aspecto era dificilmente mejorable.

Por último, en la percepción que los alumnos tienen de su capacidad de éxito (parámetro S) y en su interés por el contenido de las prácticas (parámetro I), aun cuando al observar las medias podríamos pensar que ha habido mejora, los datos no nos permiten concluir que dicha mejora sea estadísticamente significativa (p>0.05), siendo necesario seguir ampliando la toma de datos para poder extraer una conclusión al respecto.

B. Análisis cualitativo

Con el fin de analizar las claves subyacentes tras las respuestas de motivación de nuestros alumnos se han incluido en los cuestionarios una serie de preguntas "abiertas" (se contestan con comentarios y no con puntuaciones).

Un total de 18 estudiantes respondieron al cuestionario de preguntas abiertas. A continuación se presentan los resultados del análisis cualitativo sobre estas respuestas. Los números presentados en paréntesis a lo largo de cada resultado representan el número de estudiantes que se pueden considerar representado por esa respuesta. Al final del análisis cualitativo de algunas preguntas, se muestra una breve selección de las respuestas de los estudiantes, para su mejor comprensión.

- ***¿Qué tipo de decisiones has podido tomar durante las prácticas?***

  Parte de las respuestas cuantifican sus sentimientos de control o sus sentimientos de satisfacción en la realización de las mismas: (7) afirmaron controlar solo algunos aspectos de las medidas y control de los equipos. (1) afirmó no tener control alguno. (5) afirmaron tener todo el control de las mismas.

- ***¿Cuáles han sido los resultados de las decisiones que has tomado durante las prácticas?***

  La mayoría de las respuestas se cuantificaron en términos de corrección o satisfacción, siendo la mayoría de ellas positivas. Uno de ellos afirmó: "ninguna".

- ***¿Cuál crees que es la utilidad de lo que has aprendido durante las prácticas a lo largo de tus estudios?***

  La mayoría de las respuestas indican que el conocimiento adquirido es de utilidad para su vida profesional. (3) respondieron que la utilidad de los conocimientos iban más allá de la vida profesional, en concreto como cultura general. (1) consideró que no tenía utilidad concreta.

- ***¿Cuál crees que es la utilidad de lo que has aprendido durante las prácticas a lo largo de tu vida profesional?***

  Las respuestas fueron en la misma línea a la pregunta anterior, viendo positivamente su utilidad para el

desempeño de sus labores profesionales en el futuro (6). (1) concretándose algunos en la mejora de sus capacidades para trabajar en equipo. (2) Mejorar sus habilidades para afrontar y resolver problemas.

- ***¿Qué aspectos de las prácticas te han aburrido?***

  La mayoría de ellos (9) no encontraron aspectos que les resultaran aburridos. (4) resaltaron su dificultad para entender algunos conceptos o para realizar el informe final.

- ***¿Qué ayuda recibiste de tu profesora?***

  La gran mayoría se mostraron satisfechos con la ayuda recibida (16). (1) opinó que la ayuda era excesiva.

- ***¿Cómo crees que la ayuda recibida de tu profesora ha podido repercutir en tu nivel de éxito?***

  Todas las respuestas fueron realizadas en términos de satisfacción positiva (18). Algunas de ellas, además, respondieron en términos específicos como por ejemplo "Aumentándolo y haciéndonos entenderla" o "Su forma de explicar".

- ***Describe el interés inicial que tenías en las prácticas de esta asignatura.***

  Entre las respuestas (5) expresaron un alto interés, (4) un interés medio y (5) poco interés.

- ***¿Cuál es tu interés actual en la asignatura, una vez realizadas las prácticas?***

  (7) de los estudiantes respondieron que su interés era alto, (2) un interés bajo y el resto un interés medio.

- ***¿Qué aspectos de las prácticas te han resultado interesantes y/o indiferentes?***

  Las respuestas expresaron un interés en los circuitos electrónicos (5), (2) respondieron que ningún aspecto. El resto especificaron aspectos más concretos, por ejemplo, "La interactividad y la aplicación de los conceptos teóricos", "La práctica de los transformadores me resultó muy interesante".

- ***¿De qué forma se preocupó la profesora por ti?***

La mayoría de las respuestas expresaron una evaluación positiva del papel de la profesora (8) sin concretar, y (6) resolviendo sus dudas.

- ***¿Qué cosas cambiarías en el papel de la profesora?***

  La gran mayoría no cambiarían nada (15), algunos expresaron su deseo de tener una atención más personalizada (2).

El cuestionario realizado tras la experiencia con los tutores, es exactamente igual, pero evaluándolos a éstos en vez de a la profesora. Las respuestas en este caso son más positivas, mostrando un incrementado entusiasmo en las prácticas, en los conocimientos adquiridos, en la experiencia vivida y en la atención recibida.

IV. CONCLUSIONES

En este estudio se muestra una forma práctica de introducir la docencia colaborativa en prácticas de electrónica a través de la figura del tutor-alumno. Nuestro estudio demuestra de forma concluyente que con este método mejora significativamente la motivación de los alumnos, no sólo de aquellos que realizan la labor de tutor, sino también de los que son orientados y ayudados por sus compañeros en vez de por el profesor. Aunque de media la motivación de los alumnos era bastante alta y la mejora ha sido de menos de un punto, si nos fijamos en las respuestas individuales, la mejora de motivación ha sido extraordinaria en los alumnos menos motivados, de manera que al ser tutorizados por sus compañeros alumnos que tenían motivación mínima han pasado a tener alta motivación.

Por otro lado, un análisis detallado de los distintos aspectos que influyen en la motivación, según el modelo MUSIC, nos ha permitido analizar de qué modo concreto se produce dicha mejora: cuando los alumnos se involucran en la docencia, aumenta sustancialmente la sensación de control sobre su propio trabajo y aprecian más la utilidad del esfuerzo que están realizando.

No hay, sin embargo, cambio significativo en la apreciación, por parte del alumnado, de la ayuda y atención recibida, lo cual nos indica que si bien una buena tutorización por parte del profesor no puede ser mejorada cuando son los propios alumnos los que asumen el rol de tutor, tampoco empeora por el hecho de delegar en ellos parte de la responsabilidad docente.

Finalmente, no se ha conseguido mejorar de forma concluyente otros dos aspectos importantes de la motivación: las expectativas de éxito y el interés directo en los contenidos y actividades propuestas. Es necesario por tanto continuar este estudio para aumentar la significancia estadística de nuestros resultados, pero también introducir variaciones y mejoras al modo de impartir las prácticas que incidan principalmente sobre estos dos aspectos concretos.

La principal limitación de este estudio es que el poco número de alumnos matriculados en la asignatura nos ha impedido realizar un análisis más exhaustivo y ver la correlación entre la motivación de los alumnos y parámetros tales como la edad, sexo, grado que cursan o nivel previo de formación. Dichos resultados podrán ser obtenidos en el futuro, al aplicar la metodología descrita a nuevos cursos de ingeniería industrial. Su análisis e interpretación nos permitirá, en definitiva, cumplir el objetivo que se esconde detrás de este tipo de investigaciones: mejorar la motivación de nuestros alumnos y con ello su formación, tanto en contenidos como en competencias.

REFERENCES

[1] The European Parliament and the Council of the European Union. Recommendation of the Eurepean Parliament and the Council on key competenccies for lifelong learning. Official Journal of the European Union, 30(12), 2006

[2] B.D. Jones, B. D. "Motivating students to engage in learning: The MUSIC Model of Academic Motivation". *International Journal of Teaching and Learning in Higher Education, 21*(2), 272-285. 2009

[3] Bla bla C. E. Mora, B. Añorbe-Díaz, A.M. González-Marrero, J. Martín-Gutierrez and B.D. Jones. "Motivational Considerations when Introducing Problem-Based Learning in Engineering Education.

[4] M. Prince. " Does Active Learning Work? A Review of the Research". *The Research Journal For Engineering Education.* 93(3), 223-231. 2004

[5] J.F. Gómez González, P. Fabiani-Bendicho, E. Pereda de Pablo. " Enseñanza colaborativa en un laboratorio de máquinas eléctricas para facilitar el aprendizaje y optimizar la utilización de recursos". En XIX CUIEET, ed. Congreso Universitario de Innovación Educativa en las Enseñanzas Técnicas. Barcelona, 2011

[6] I.T. Martín-Mateos, J.F. Cómez González, P. Fabiani-Bendicho. "Diseño y Evaluación de Estrategia Colaborativa en las Clases Prácticas de Laboratorio" (en prensa), 2017

[7] IEEE Author Center, "Templates for IEEE Transactions on Industrial Electronics" [online]. 2017 [Accessed September 2017] . Available from: http://ieeeauthorcenter.ieee.org/create-your-ieee-article/use-authoring-tools-and-ieee-article-templates/ieee-article-templates/templates-ieee-transactions-industrial-electronics/.

[8] B.D. Jones. "Motivating Students to Engage in Learning: The MUSIC Model of Academic Motivation". *International Journal of Teaching and Learning in Higher Education.* 21(2). 272-285. 2009

[9] Deci, E. L., & Ryan, R. M. "A motivational approach to Integration in personality". In R. Dienstbier (Ed.), Nebraska Symposium on Motivation: Vol. 38. Perspectives on motivation (pp. 237-288). Lincoln: University of Nebraska Press. 1991

[10] A. Wigfield and J. Eccles. Contemporary Educational Psychology 25, 68–81. 2000

[11] A. Wigfield and J. Eccles. The development of achievement task values: A theoretical analysis. Developmental Review, 12, 265–310. 1992

[12] Hidi and K. Ann Renninger. (2006). "The Four-Phase Model Of Interest Development".*Educational Psychologist*. Volume 41, Issue 2. 111-127

[13] N. Noddings. "The challenge of care in schools: An alternative approach to education". N.Y: Teachers College Pres. 1992

[14] B.D. Jones. User guide for assessing the components of the MUSIC® Model of Motivation. 2017 [Accessed January 2018]. Available from: http://www.theMUSICmodel.com, Enero de 2017

[15] B.D. Jones and J.L.M. Wilkins. "Testing theMUSIC Model of Academic Motivation throug confirmatory factor analysis. Educational Psychology, 33(4), 2013-7, pp.482-503

[16] P. Kline. "Handbook of Psychological Testing", Routledge, London, 2013

[17] D. George and P. Mallery on SPSS for Windows step by step: A simple guide and reference. 4th ed.. Boston: Allyn & Bacon, 2003, pp.23

SESIÓN II.C: FUNDAMENTOS DE ELECTRÓNICA / ELECTRÓNICA DE POTENCIA

Adaptación de un Banco de Ensayos de un Motor de Ignición por Compresión mediante Trabajos Fin de Grado y Proyectos Fin de Carrera

Raquel Fernández-Ramos[1]; Francisco J. Martos-Ramos[2]; Jose A. Hidalgo-López[1]; Francisco J. Rios-Gómez[1]; Jose F. Martín-Canales[1]; Manuel J. Martín-Vázquez[1]; Jorge Romero-Sánchez[1]

[1]Departamento de Electrónica. Universidad de Málaga, 29071, Málaga, España.
[2]Departamento de Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos. Universidad de Málaga, 29071, Málaga, España
ramos@uma.es;fjmartos@uma.es;jahidalgo@uma.es;fjrios@uma.es;jfmartin@uma.es;martinv@ctima.uma.es;jromeros@uma.es

***Resumen*— La colaboración entre diferentes áreas de conocimiento en la realización de los proyectos fin de grado enriquece la formación de los alumnos. En esta comunicación se presenta la experiencia de cooperación entre las áreas de Máquinas y Motores Térmicos y de Electrónica para la realización de Trabajos Fin de Grado (TFG) y Proyectos Fin de Carrera (PFC) encaminados hacia la obtención de los títulos de Grado en Electrónica, Robótica y Mecatrónica y Grado en Ingeniería Mecánica. Todos los trabajos se orientaron hacia la adaptación de un banco de ensayos de un motor de ignición por compresión, tanto en su parte mecánica y energética como electrónica.**

Palabras clave*— *Motor de Ignición por Compresión; Banco de Ensayo; FPGA; Instrumentación Electrónica Virtual.

I. INTRODUCCIÓN

Los TFG forman parte como materia o asignatura obligatoria del plan de estudios de los títulos oficiales de Graduado. Deben estar orientados a la adquisición de las competencias generales definidas en la titulación y, en su caso, a aquellas otras recogidas en la ficha descriptiva de la Memoria de Verificación del título [1] [2].

Estos trabajos consisten en un trabajo autónomo e individual que cada estudiante realiza bajo la orientación de un tutor, quien actuará como dinamizador y facilitador del proceso de aprendizaje.

Un TFG podría definirse como la realización de un proyecto, en el que se integren y desarrollen los contenidos recibidos, capacidades, competencias y habilidades adquiridas durante el periodo de docencia del grado.

Por otro lado, gran parte de las asignaturas de electrónica en los últimos cursos de las titulaciones que se imparten en la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga tienen un alto contenido práctico que se realiza en laboratorios. Sin embargo, a pesar del elevado número de prácticas que hace el alumno, éste se queja de la falta de conexión de estas prácticas con los sistemas con los que va a trabajar en su futuro profesional. Esto nos ha llevado a una cooperación entre áreas de conocimiento a través de la realización de TFG conjuntos sobre una plataforma real y haciendo uso de herramientas que los alumnos emplean en las prácticas de electrónica y que son las mismas que muchos de ellos usarán en su futuro entorno de trabajo.

Todos los trabajos realizados y propuestos están orientados hacia la adaptación de un banco de ensayos de un motor de ignición por compresión en sus diferentes aspectos: mecánicos, energéticos y electrónicos. Siempre con el objetivo último de poder ser usado en prácticas de las asignaturas que imparten ambas áreas en las distintas titulaciones y que permitirán integrar haciendo uso de un sistema real los conocimientos adquiridos en sus estudios.

Para presentar la experiencia que se está llevando a cabo, este artículo se organiza de la siguiente manera: en primer lugar, en la Sección II, se justifica la motivación y los objetivos de la propuesta. En la Sección III, se presentan el contexto en el cual se ha desarrollado la experiencia. En la Sección IV se presenta el resultado de los trabajos que se han desarrollado, destacando dos de ellos que se describen con más detalle. Finalmente, en la Sección V se resumen las conclusiones y discusiones del trabajo realizado hasta la fecha.

II. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

A. Motivación

Uno de los principales retos en la enseñanza es conseguir la motivación de los alumnos. En las asignaturas de Instrumentación Electrónica y Control e Instrumentación y Acondicionamiento de Señal, entre otras, se ha venido observando que los alumnos perciben una desconexión entre los sistemas que utilizan en las prácticas de laboratorio y los reales.

Por otro lado, en el área de Máquinas y Motores Térmicos se disponía de una bancada recientemente adquirida de un motor de ignición por compresión con un freno de polvo magnético utilizados para hacer medidas de régimen y par motor, ver Fig. 1. Todo ello con un sistema de control obsoleto y manual.

Se pensó que, si se automatizaba y sensorizaba la bancada, haciendo uso de sistemas electrónicos, se podría sacar mucho partido de ella en asignaturas de instrumentación en forma de prácticas. Al analizar las tareas a realizar, se llegó a la conclusión que muchas de ellas podrían ser realizadas por los propios alumnos con la supervisión de profesores de las áreas de Electrónica y Maquinas y Motores Térmicos. Un marco ideal para realizar esta tarea son los TFG.

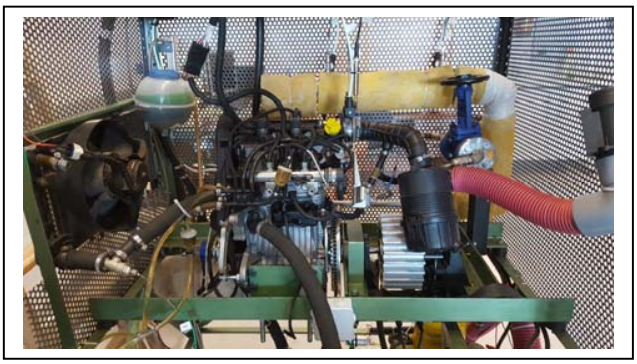


Fig. 1. Motor de Ignición por Compresión.

B. Objetivos

El principal objetivo consiste en desarrollar e implementar un sistema electrónico para la Supervisión y Control de un Banco de Ensayos de un Motor de Ignición por Compresión haciendo uso de los más avanzados dispositivos de lógica programable y reconfigurable mediante FPGAs (***F**ield **P**rogrammable **G**ate **A**rray*) y orientado a la realización de Trabajos de Fin de Grado/Máster y a prácticas conjuntas entre las áreas de Máquinas y Motores Térmicos y de Electrónica.

Con cada sección del proyecto realizado, el alumno implicado ha obtenido el título correspondiente a los estudios cursados y el resultado se revierte en la realización de prácticas por parte de otros alumnos de últimos cursos en otras titulaciones para que, por un lado, complementen en el laboratorio los conocimientos impartidos en las asignaturas correspondientes y, por otro lado, se fomente el trabajo en equipo.

Al ser trabajos y prácticas multidisciplinares, con alumnos provenientes de distintos grados y con diferentes conocimientos (Máquinas y Motores, Mecánica y Electrónica), el intercambio de conocimiento está garantizado, ya que los TFG y prácticas se realizan en el laboratorio físicamente. Esta forma de trabajar de manera multidisciplinar es común en la industria, por ejemplo, en el sector de la automoción en donde la mecánica y la electrónica van de la mano. De hecho, el uso de sistemas electrónicos embebidos y de lógica reconfigurable forman parte de las campañas de publicidad de los coches anunciados por los medios de comunicación.

Como se ha comentado, el sistema final se utilizará en prácticas, por lo que mientras sea posible, las herramientas empleadas deben ser las mismas que aquellas que usan los alumnos en las prácticas.

III. Contexto

Este trabajo se enmarca dentro de las titulaciones que se imparten en la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga. En concreto en las titulaciones donde imparten docencia las áreas de Máquinas y Motores Térmicos y de Electrónica. En la actualidad, se está realizando esta experiencia en el marco de 2 PIEs (Proyectos de Innovación Educativa), financiados por la propia universidad, en el que participan ambas áreas. El primero fue el PIE15-123 cuyo título es 'Desarrollo e Implementación de un Sistema SCADA para la Supervisión y Control de un Banco de Ensayos de un Motor Diésel'. Al que continúa el PIE17-049 titulado 'Adaptación de un Banco de Ensayos de un Motor Diésel mediante Trabajos Fin de Grado y Máster para la realización de prácticas docentes'. Ambos proyectos están orientados a la realización de PFC/TFG y prácticas conjuntas, por medio del uso de una misma plataforma y un banco de ensayos de un motor de ignición por compresión.

La metodología empleada sigue el curso natural de los TFG con el añadido de que todos ellos presentan un grado de interrelación (secuencialidad u ordenación en el tiempo) muy elevado.

Para la elaboración de un TFG se sigue el procedimiento estándar que propone la actual Escuela de Ingenierías Industriales que, en resumen, se podría dividir en las siguientes fases ordenadas en el tiempo:

1) Planteamiento del problema: se fija el contexto de estudio, estado del conocimiento y antecedentes, si los hubiera, un posible diseño y elaboración de diagramas de tiempos del trabajo. Este planteamiento se plasma en un anteproyecto que será evaluado exhaustivamente por una comisión que representa todas las áreas de conocimiento que se imparten docencia en la Escuela. Esta comisión aplica los criterios de calidad pre-establecidos y valida la viabilidad del proyecto.

2) Diseño e implementación de la solución propuesta: Esta fase es la que se extiende más en el tiempo. En ella se realiza la verificación del correcto funcionamiento del sistema (si es implantable).

3) Elaboración de la memoria de resultados del TFG: En ella el alumno realizará el documento que refleja todo su trabajo y deberá defender ante un tribunal.

4) Defensa del TFG: Será la fase final de evaluación en la que el alumno expondrá y responderá a las cuestiones planteadas por el tribunal.

Cada TFG ha de seguir este procedimiento que se estima en una duración de 6 meses. Es destacable que, puesto que todos los trabajos están relacionados, se han de ordenar en el tiempo, a no ser que se puedan realizar de forma simultánea (resultados previos de un trabajo para la realización de otro), aunque se ha tratado en lo posible de paralelizar atendiendo a recursos y personal docente todas las tareas de la forma más óptima posible.

IV. RESULTADOS

Los principales resultados que se han obtenido de esta experiencia residen en los TFG abordados, de los cuales destacan dos que serán tratados más ampliamente.

Los trabajos realizados por los alumnos se han orientado para que los resultados puedan ser utilizados por otros alumnos en sus prácticas, por ello siempre que ha sido posible se han empleado las herramientas de diseño y desarrollo que han aprendido a utilizar en asignaturas de electrónica como puede ser Labview@ o las herramientas de diseño de FPGA de Xilinx y de simulación e implementación de circuitos de Cadence@.

A. Ejemplos de trabajos realizados

A continuación, se presentan algunos de los trabajos más relevantes realizados hasta la fecha en el contexto de los Proyectos de Innovación Educativa.

1) Gestión de ECU Marelli SRAE and SRT mediante Lógica Reconfigurable en un entorno basado en LabView: Con el resultado de este TFG**,** se puede controlar desde el SCADA (***S**upervisory **C**ontrol **A**nd **D**ata **A**cquisition*) la Centralita Electrónica del motor (en inglés, ***E**lectronic **C**ontrol **U**nit* ó **ECU**). Haciendo uso de los protocolos estándar de comunicaciones de las ECUs comerciales de forma inalámbrica mediante lógica reconfigurable y Bluetooth. El alumno conectó y leyó toda la cartografía (parámetros vitales del motor que gestionan su correcto funcionamiento), dejando preparado, para un futuro TFG, la posibilidad de reprogramar dichos parámetros, con el objetivo de mejorar el rendimiento del mismo.

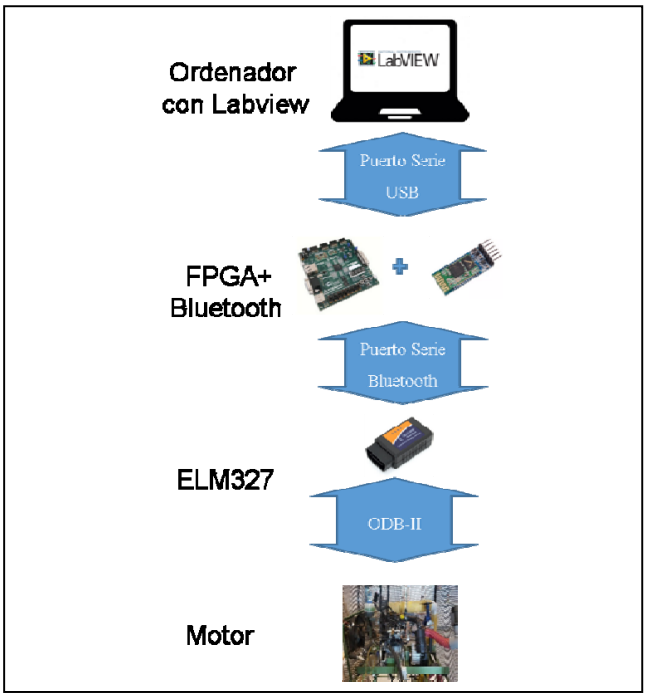


Fig. 2. Elementos principales

El sistema desarrollado a lo largo de este TFG lo formaron 4 partes principales como se puede ver en la Fig. 2: El motor, el interfaz ELM327, la FPGA y el ordenador con Labview [3].

El interfaz ELM327 es un dispositivo que se conecta al puerto OBD (***On-B**oard **D**iagnostic*) del motor. Permite acceder a la información que disponen los sensores conectados a la ECU. Se trata de una pasarela CAN-Bluetooth, por lo que la FPGA se encarga de realizar dicha conexión de forma autónoma y transparente de cara a la visualización final de información.

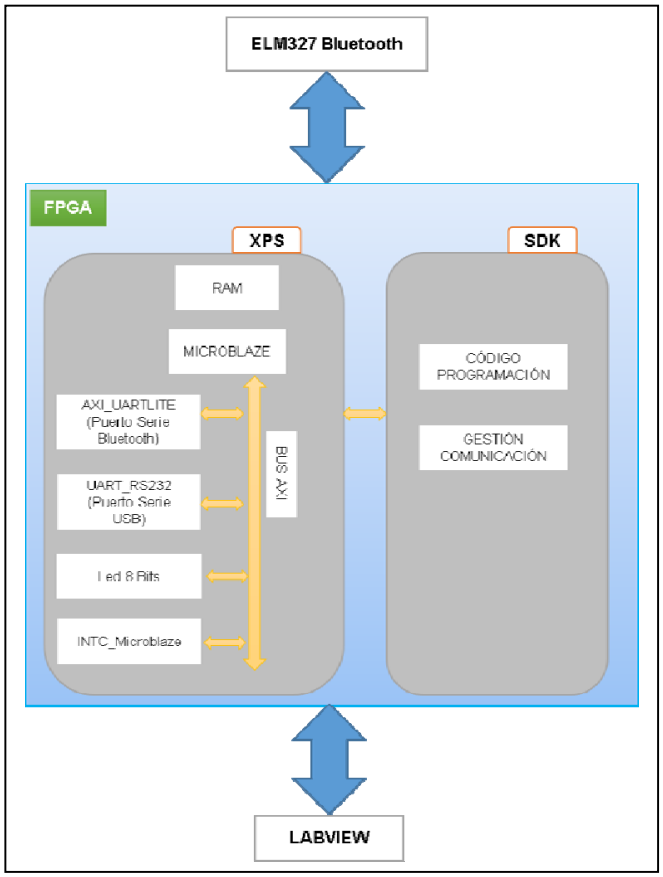


Fig. 3. Diagrama de bloques del sistema desarrollado en la FPGA.

La FPGA empleada es la Spartan-6 LX16 de Xilinx que se encuentra en el sistema de desarrollo utilizado Nexys 3 [4]. La selección de este sistema se debe a que es la que emplean los alumnos en las prácticas de muchas de las asignaturas de electrónica. La FPGA se encarga de gestionar la conexión entre la ECU y el panel de muestra de información en LabView. Para realizar esta función se ha desarrollado un sistema embebido haciendo uso del software de desarrollo EDK de Xilinx (Embedded Development Kit). El EDK tiene 2 partes principales: XPS (Xilinx Platform Studio) usado para el diseño de la parte hardware del Sistema de procesamiento embebido, y SDK (Software Development Kit) para el desarrollo del software que ejecutará el sistema de procesamiento.

El hardware embebido diseñado es un sistema que consta del procesador Microblaze con su memoria y el gestor de

interrupciones, además de los periféricos de comunicación serie y de manejo de los leds. El software desarrollado se encarga de adquirir los datos del motor proporcionados por el ELM327, procesarlos y remitir al PC (***P**ersonal **C**omputer*) la información que se solicite. El esquema de todo el sistema que está implementado en la FPGA se puede ver en la Fig. 3

Labview se utiliza como interfaz con el usuario final, de manera que se pueden consultar los parámetros del motor de manera sencilla. Algunas informaciones a las que se tiene acceso desde LabView son la temperatura del refrigerante del motor, el régimen en revoluciones por minuto del motor, tensión de la batería, la posición del motor o los fallos almacenados en la ECU, entre otros. En la Fig. 4 se muestra el interfaz de usuario del módulo de Labview desarrollado en este TFG. Este trabajo forma parte del sistema SCADA final que integrará a todos los módulos Labview desarrollados en los diferentes TFG.

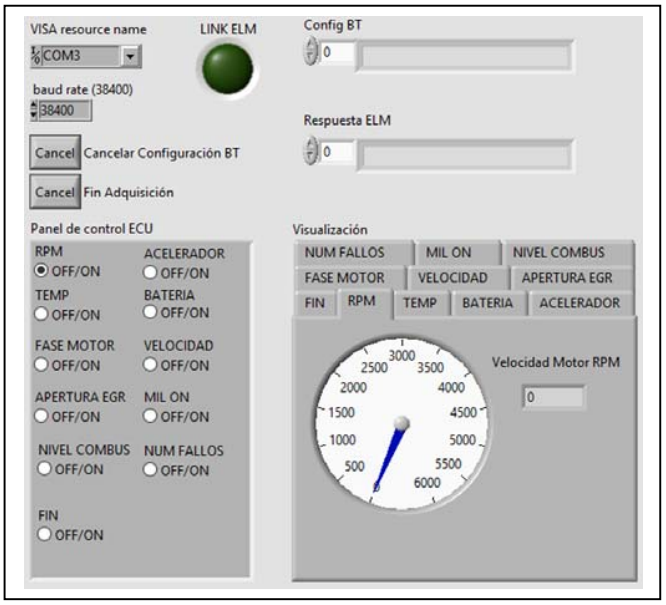


Fig. 4. Interfaz con el usuario en Labview.

El trabajo realizado en este TFG permitirá a alumnos de Instrumentación Electrónica y Control e Instrumentación y Adquisición de Señal de GIERM (**G**rado de **I**ngeniería **E**lectrónica, **R**obótica y **M**ecatrónica) estudiar la adquisición de datos sobre un motor real desde la plataforma de instrumentación virtual LabView. Además de posibilitar la ampliación del sistema mediante la integración de nuevos elementos del motor.

2) Gestión Automática de Aceleración y Frenado de un Motor Diésel Mediante Electrónica Reconfigurable en un Entorno Basado en LabView: En este TFG se realizó otra fase de automatización electrónica del motor con las últimas técnicas de control, mediante instrumentación virtual y lógica reconfigurable del acelerado y freno del motor. Como principal resultado se consiguió eliminar la electrónica obsoleta que se estaba utilizando con control totalmente manual, pudiéndose de esta forma simplificar el cambio de parámetros de manera totalmente automática y la gestión de las consignas principales del motor, como es la Aceleración-Frenado del motor diésel permitiendo de este modo calcular las curvas par motor-régimen necesarias para el estudio de rendimiento y emisiones del mismo.

El sistema desarrollado a lo largo de este TFG lo formaron 4 partes principales como se puede ver en la Fig. 5: El motor, la FPGA, el ordenador con Labview y la PCB (**P**rinted **C**ircuit **B**oard) diseñada en este TFG.

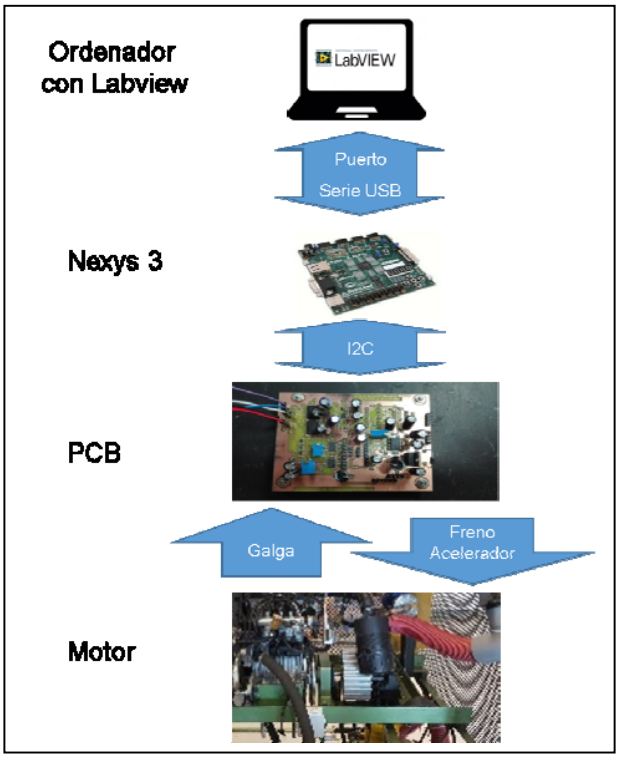


Fig. 5. Elementos principales. Sistema de Aceleración y frenado

En este TFG las partes del motor sobre las que se actúan son el sistema de aceleración y frenado. Actuando sobre ellos se consigue el régimen del motor y el par deseados. El freno del que dispone el motor es un freno de partículas magnéticas las cuales actúan como un fluido hasta que se le aplica un campo electromagnético, compactándose y bloqueando así el giro del cigüeñal. Este freno se utiliza para hacer pruebas con el banco del motor. La aceleración es regulada por un acelerador con dos potenciómetros redundantes que regulan las tensiones entre los terminales que lee la ECU y ésta interpreta la aceleración que debe aportar al motor.

La PCB construida en este TFG lleva a cabo la regulación de la aceleración y el frenado. Enlaza con la ECU y el freno de partículas magnéticas y usa la realimentación de la señal de una galga extensiométrica para regular la frenada mediante un regulador PID, y se conecta al sistema de desarrollo Nexys 3. Permite, por un lado, el control manual de forma paralela al generado desde Labview, pudiéndose seleccionar uno u otro

por medio de conmutadores y, por otro lado, es posible realizar un bypass del PID integrado en la PCB para, de este modo, utilizar uno digital desde Nexys 3. En la Fig. 6 se ilustra el diagrama esquemático diseñado para generar tanto la PCB, como las simulaciones realizadas en el entorno Cadence-Orcad-PSpice [5].

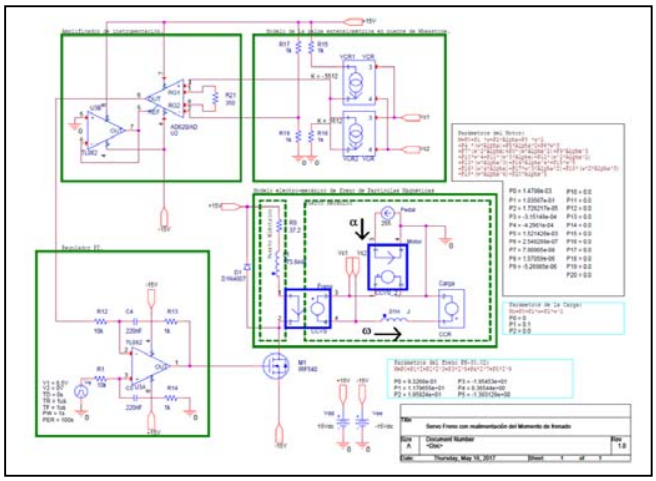


Fig. 6. Esquemático de simulación y PCB

En la Fig. 6 se puede observar el esquema del regulador de frenada implementado y que actúa sobre un modelo matemático del motor de ignición por compresión-freno de polvo magnético, cerrándose el lazo de control por medio una galga extensiométrica en configuración de puente de Wheastone que va conectada a un amplificador de instrumentación y que mide el par de frenada que actúa sobre el cigüeñal del motor. La actuación de aceleración se ha implementado con potenciómetros electrónicos de estado sólido (EEPOT) y la consigna de frenada y señal de error se aplica a través de conversores analógico-digital y digital-analógico (AD/DA).

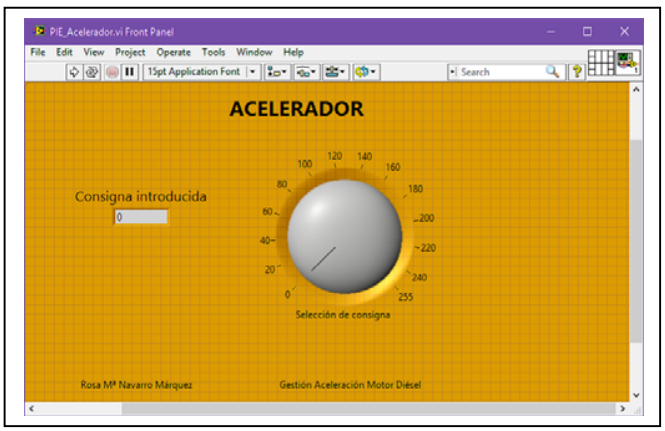


Fig. 7. Interfaz con el usuario en Labview. Sistema de Aceleración

El sistema de desarrollo basado en FPGA, Nexys 3, utilizado en este TFG es el mismo que en el anterior por idénticas razones. También se ha desarrollado un sistema embebido haciendo uso del sistema de desarrollo EDK de Xilinx, para diseñar tanto el hardware como el software embebido en la FPGA.

El hardware embebido diseñado es un sistema que consta del procesador Microblaze con su memoria y los periféricos de comunicación serie, de manejo del display de siete segmentos y de control del bus IIC (***I**nter-**I**ntegrated **C**ircuit*). El software desarrollado se encarga comunicarse con la PCB, adquirir y procesar los datos y remitir al PC la información que solicite.

En este TFG se ha desarrollado un nuevo módulo de Labview para poder controlar el sistema de aceleración. Éste se integrará en sistema SCADA para el control y supervisión del motor desarrollados en los diferentes TFG llevados a cabo. En la Fig. 7 se muestra el interfaz de usuario del módulo de Labview desarrollado en este TFG.

B. Resumen de otros trabajos realizados

Se han realizado durante esta experiencia también los siguientes trabajos:

1) Montaje y ensayo de un motor diésel bicilíndrico: En este trabajo los alumnos pusieron en marcha el montaje de la bancada y el primer arranque (de forma manual) del sistema de ensayo, añadiendo el panelizado eléctrico y evacuación segura de gases de combustión del motor.

2) Montaje y Ensayo de un Motor Diésel Bicilíndrico. Acople de un Compresor Centrífugo: Perteneciente a la clase de TFG de mecánica se incorpora una nueva prestación al motor: el turbocompresor centrífugo que, en los motores diésel mejora la eficiencia de la combustión y que se incorporan de serie en los modelos comerciales.

3) Efectos de la Sobrealimentación de un Motor Diésel sobre la Morfología del Hollín Producido: Fue el primer Trabajo de ensayo sobre la bancada construida, abordó uno de los tópicos más importantes relacionados con los motores alternativos: la generación de subproductos procedentes de la combustión que repercuten en la eficiencia y sustancias contaminantes producidas.

4) Desarrollo en Labview del Interfaz para Realizar Ensayos de Motores: Este trabajo fue el primer intento de automatizar el banco de ensayos, preparando el terreno para la incorporación de todo el sistema automático de medidas que empezó el año siguiente.

5) Diseño y Construcción de un Reactor Catalítico para el Motor Bicilíndrico de Raíl común: Este trabajo desarrolla y monta en el banco un reactor para el análisis de diferentes catalizadores de emisiones.

6) Montaje y Ensayo de un EGR en un Motor Diésel: Para reducir la emisión de **NOx** (Óxidos de Nitrógeno), uno de los principales contaminantes emitidos por los motores diésel, se incorporó en el motor un Recirculador de Gases de Escape (en inglés, Exhaust Gas Recirculator ó EGR) que combina parte de los gases de escape con el aire aspirado para reintroducirlos en la cámara de combustión. Su efecto es la reducción de emisiones. Los EGRs se incorporan en prácticamente todos los modelos diésel de serie.

C. *Otros trabajos en curso*

A continuación, se van a enumerar los trabajos que están actualmente siendo desarrollados en el marco del PIE17-049.

1) Medidas de Régimen de un Motor Diésel Mediante Electrónica Reconfigurable en un Entorno Basado en LabView. Diseño de un sistema embebido basado en la placa ZYBO (ZYnq BOard) [6] que se conectará a un PC y que se usará para adquirir señales del motor mediante un sensor óptico.

2) Implantación del acelerador y Sintonía del PID del servofreno en el motor Diésel. Diseño de PCB que permita el control de servofreno y el acelerador de forma óptima. Este TFG complementa el realizado en el anterior TFG denominado Gestión Automática de Aceleración y Frenado de un Motor Diésel Mediante Electrónica Reconfigurable en un Entorno Basado en LabView y que se ha detallado anteriormente.

3) Medidas de Presión en Cámara de Combustión y desarrollo del Circuito Mediante Electrónica Reconfigurable en un Entorno Basado en LabView. Diseño de un sistema embebido basado en la placa Zybo que se conectará a un PC y que se usará para adquirir señales del motor mediante un sensor de presión piezoeléctrico situado en la cámara de combustión de uno de los cilindros.

4) Monitorización de Temperaturas del Motor en un Entorno Basado en LabView haciendo uso de una Conexión Ethernet. Adquisición de datos en Labview de sensores de temperatura conectados por ethernet.

V. Conclusiones y Discusiones

Como resultado de la experiencia se han leído los 6 TFG y 3 PFC, de los cuales 3 de ellos condujeron a la obtención de la titulación en Ingeniería Técnica Mecánica, 3 al Grado de Ingeniería Mecánica, 2 al Grado en Ingeniería de Tecnología Industriales y uno al Grado de Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica. Todos ellos obtuvieron la calificación de Sobresaliente o Matrícula de Honor. Los alumnos además tuvieron durante el proceso apoyo de profesores de distintas áreas, lo que les ha permitido reforzar e integrar conocimientos adquiridos durante la carrera.

Durante esta experiencia ha habido una serie de dificultades a las que ha habido que enfrentarse y que ha retrasado el desarrollo del sistema. Entre ellas caben destacar las siguientes:

Dificultad para encontrar alumnos que quieran realizar el TFG. Se ha observado que, aunque resulta atractiva la idea de un sistema real, a la vez transmite una idea de dificultad que provoca el rechazo en parte del alumnado. Ante esto en las nuevas propuestas se ha intentado simplificar y explicar mejor que, aunque hay complejidad, ésta no es insalvable.

Dificultad para cumplir los plazos inicialmente estimados para cada TFG. Dado que esta tarea hay que compatibilizarla con otras asignaturas, el tiempo de dedicación no es el que inicialmente se consideró. Esto ha complicado la secuencialidad de los TFG.

A pesar de las dificultades encontradas, los alumnos manifestaron gran satisfacción con la realización de los TFG. Lo que más valoraron fue el hecho de poder construir un sistema real, con los conocimientos adquiridos durante sus estudios abarcando diferentes disciplinas. Sintiéndose por un lado orgullosos y por otro sorprendidos del resultado.

En el momento actual, no se han realizado prácticas con la bancada, aunque está previsto incluir su uso en las asignaturas de Instrumentación Electrónica y Control e Instrumentación y Acondicionamiento de Señal de GIERM.

Agradecimientos

Esta experiencia está financiada y se realiza en el marco de los proyectos de innovación educativa PIE15-123 y PIE17-049 de las convocatorias de proyectos de innovación educativa PIE2015/2017 y PIE2017/2019 convocados por el Vicerrectorado de Personal Docente e Investigador de la Universidad de Málaga, por ello se quiere agradecer a la Universidad de Málaga la posibilidad de realizar esta experiencia que creemos, sin duda que favorecerá a la formación de los alumnos.

Referencias

[1] España. Real Decreto 1393/2007, de 29 de octubre. BOE, 29 de octubre de 2007, núm. 260, p. 44037-44048

[2] UNIVERSIDAD DE MÁLAGA. Vicerrectorado de Ordenación Académica y del Profesorado ,2013 <https://www.uma.es/media/files/EPS-ReglamentoUMA-TFG.pdf> [Consulta: 5 de Febrero de 2018]

[3] Lajara Vizcaíno, J. and Pelegría Sebastiá, J. *LabVIEW. Entorno de programación*. Barcelona, Marcombo, 2007.

[4] DIGILENT, "NEXYS 3 FPGA Board Reference Manual", 2016. https://reference.digilentinc.com/_media/nexys:nexys3:nexys3_rm.pdf. [Consulta:11 de Febrero de 2018].

[5] Kraig Mitzner.*Complete PCB Design Using OrCAD Capture and PCB Editor*. Elsevier, 2009.

[6] DIGILENT, "ZYBO FPGA Board Reference Manual", 2017 https://reference.digilentinc.com/reference/programmable-logic/zybo/reference-manual [Consulta:11 de Febrero de 2018].

Placas de convertidores DC-DC de bajo coste aplicadas a la docencia de Sistemas Electrónicos

J. D. Aguilar-Peña, J.I. Férnandez-Carrasco, D. Cintas-Cintas
Escuela Politécnica Superior de Jaén.
Universidad de Jaén. Jaén (España)
jaguilar@ujaen.es

***Abstract*—El presente trabajo se centrará en un análisis de la enseñanza práctica de la electrónica de potencia y cómo la podríamos realizar con estudiantes del Máster de Ingeniería Industrial, al que acceden un gran número de alumnos procedentes de especialidades muy diferentes con un perfil heterogéneo de conocimientos en el ámbito de la electrónica de potencia. En el trabajo se presentan recursos para abordar los conceptos de convertidores conmutados, mediante la utilización de herramientas de simulación on-line en aula de informática y trabajo en casa, que ponen los distintos fabricantes de circuitos integrados a nuestra disposición, junto con la utilización de placas comerciales DC-DC de muy bajo coste.**

Keywords—convertidores DC-DC, prácticas laboratorio, docencia práctica en masters, prácticas bajo coste

I. INTRODUCCIÓN

Es importante decir tal y como Muñoz y García comentan en [1] citando a Zabalza [2], que a raíz de la implantación del Espacio Europeo de Educación Superior (EEES) y del sistema de créditos, se ha creado la necesidad de que los profesores nos preguntemos ¿qué enseñamos?, ¿qué queremos que aprendan nuestros alumnos?, ¿qué necesitan aprender y cómo deben ser diseñadas las tareas y actividades para que este aprendizaje sea significativo? [3].

Los contenidos teóricos y prácticos junto con su sincronización, permiten que las prácticas constituyan realmente una fase integrada en un único proceso de aprendizaje. La experimentación activa incluye toda "actividad que favorezca el desarrollo de las habilidades y destrezas de los alumnos en la aplicación de conceptos, teorías o modelos con el fin de obtener un mayor afianzamiento de los mismos [4].

La observación y testeo de sistemas electrónicos desde el punto de vista de caja negra, permite observar los resultados de los contenidos teóricos estudiados previamente y simulados mediante distintos programas de una manera rápida, y nos facilita desarrollar distintas prácticas en un corto espacio de tiempo.

Tal y como se comenta en el apartado de "Contexto", este trabajo se enfoca a una asignatura que se imparte en el master de Ingeniería Industrial "Sistemas Electrónicos e Instrumentación Industrial" a la que acceden titulados con muy distintas formaciones y bases de conocimientos. La parte que nos atañe sobre los convertidores de potencia y más en concreto sobre los convertidores conmutados DC-DC, abarca desde nulos conocimientos, como los que tienen los alumnos de Grados en Ingeniería Mecánica, Organización Industrial o Ingeniería Química, a una visión más profunda como la impartida en asignaturas relacionadas con la electrónica de potencia, en concreto para los Grados de Ingeniería Eléctrica y Electrónica Industrial.

Teniendo en cuenta lo comentado en el párrafo anterior, en el trabajo se presenta una propuesta de método para abordar los conceptos de convertidores conmutados, mediante el uso de herramientas de simulación genéricas ampliamente utilizadas, o simulación on-line que ya nos suministran la mayoría de los fabricantes de circuitos integrados, para utilizarlas en aula de informática o como trabajo personal en casa, junto con medidas experimentales en laboratorio, realizadas sobre placas comerciales ya montadas DC-DC de muy bajo coste.

Esta propuesta, no pretende detallar un programa docente de prácticas de una manera exhaustiva, si no dar a conocer algunas de las herramientas tanto de software como de hardware y que sirva de punto de partida para el debate y reflexión dentro de nuestra comunidad educativa. Aunque en este curso académico, ya se están realizando algunas pruebas sobre distintas placas de bajo coste con un grupo reducido de alumnos.

Después de esta breve introducción en la sección II se encuadra el trabajo en una titulación concreta y asignatura determinada, en la sección III se realizan algunas consideraciones relacionadas con la materia de electrónica de potencia; y en la sección IV se describen los resultados de búsqueda de material a utilizar en las clases prácticas, en el que gracias a la evolución de la electrónica de bajo coste se analiza la posibilidad de utilizar placas comerciales de convertidores conmutados en el laboratorio, junto con el software on-line que suministran los fabricantes para realizar el proceso de diseño de convertidores DC-DC, para finalmente en el apartado de conclusiones, comentar algunos resultados obtenidos.

II. CONTEXTO

Este trabajo que se presenta se implementará dentro del Master en Ingeniería Industrial que se imparte en la Escuela Politécnica Superior de Jaén [5]; habilitado para profesiones reguladas de acuerdo con la Orden CIN/311/2009, de 9 de febrero, BOE de 18 febrero de 2009 [6].

El plan de estudios mencionado consta de 120 créditos ECTS, que se estructuran en materias obligatorias con un total de 78 créditos, Trabajo Fin de Master con 12 créditos y 30 más de materias optativas (complementos de formación). Las materias obligatorias se dividen a su vez en tres módulos: (1) Módulo de Tecnologías Industriales (40 ECTS), (2) Módulo de Gestión (18 ECTS) y (3) Módulo de Instalaciones, plantas y construcciones complementarias (20 ECTS)

Del total de 16 asignaturas que conforman el módulo de materias obligatorias, solamente hay una asignatura en la que se imparten contenidos relacionados con el área de conocimientos de Tecnología Electrónica, llamada "Sistemas Electrónicos e Instrumentación Industrial", en la que según la memoria del Master se le asigna la competencia específica "CE07: Capacidad para diseñar sistemas electrónicos y de instrumentación industrial" con un total de 5 créditos ECTS, divididos en partes iguales entre las dos materias que conforman la asignatura.

Al Máster de Ingeniería industrial acceden Graduados de Ingeniería Mecánica, Eléctrica, Electrónica Industrial, Química y Organización Industrial (pudiendo acceder de otras universidades con algún otro tipo de Grado), como se puede apreciar en la figura 1. Esta gran heterogeneidad determina que las asignaturas optativas de complementos de formación, traten de que todos los alumnos del programa de Ingeniería Industrial adquieran las mismas competencias independientemente del grado con el que acceden al Máster. Este módulo como se ha comentado anteriormente está formado por nueve asignaturas de distintas materias, entre las cuales el alumno deberá de cursar 30 créditos en función de la especialidad que tengan previamente.

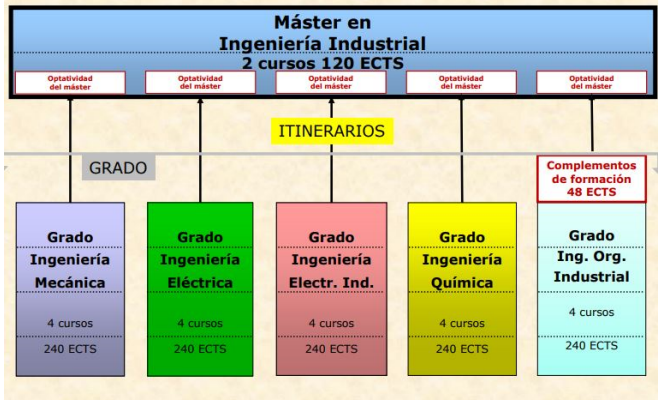


Fig. 1. Diagrama de acceso de titulados al Master de Ingeniería Industrial con los créditos ECTS correspondientes en la EPS de Jaén.[On line en http://eps.ujaen.es/masterInd/2015_Pres_Master_Ing_Ind.pdf]

Entre estas materias optativas, hay dos de ellas correspondientes a nivelación de contenidos en electrónica, la asignatura de "Electrónica Analógica y Digital", que trata de complementar los conocimientos adquiridos en la asignatura troncal común para todos los alumnos del grado en ingeniería "Fundamentos de Electrónica", y la asignatura de "Control Automático y Electrónica Programada"; en la que la mitad es del área de conocimientos de Tecnología Electrónica, impartiéndose fundamentos de microcontroladores; cada una de ellas con 4 ECTS, solo con teoría y resolución de problemas en pizarra, sin entrar en el laboratorio de electrónica.

Este trabajo que presentamos, se enmarca dentro de la asignatura obligatoria "Sistemas Electrónicos e Instrumentación Industrial". En la actualidad se trata de dar conceptos relacionados con la electrónica que se consideran de interés para el futuro titulado que deberá de ejercer la profesión, y relacionados con la competencia específica (CEO7) citada anteriormente, se distribuye el temario de la asignatura tal y como aparecen en la tabla 1. Distribuyendo los 5 créditos ECTS en (2,5+2,5)

TABLA 1. CONTENIDOS DE SISTEMAS ELECTRÓNICOS E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

Bloque 1: Sistemas electrónicos (1,5CT+1 CP ECTS)
Convertidores electrónicos de potencia.
Fuentes de alimentación (reguladas y conmutadas)
Aplicaciones de sistemas electrónicos
Bloque 2: Sistemas de adquisición de datos e instrumentación industrial (1,5CT+1 CP ECTS)
Filtrado
Sensores y transductores.
Circuitos de acondicionamiento de señal
Software industrial
Instrumentación industrial y comunicaciones industrial

III. ELECTRÓNICA DE POTENCIA

La electrónica de potencia ha dejado de ser una disciplina complementaria, para convertirse desde hace años en una materia de primer nivel, que aparece en no todos los planes de estudio como materia troncal y obligatoria. Sí, aparece por supuesto en el Grado de Electrónica Industrial, en el que tradicionalmente se ha impartido desde su inicio; y en el Grado de Ingeniería Eléctrica, que a raíz de la remodelación de los planes de estudios ya la incorpora como materia troncal e independiente en casi todos ellos, dado la gran implantación de convertidores electrónicos en el tratamiento y distribución de la energía eléctrica; dispositivos para la transmisión flexible de potencia eléctrica, FACTS, HVDC y STATCOM/SVC, control de la potencia activa y reactiva, Smart Grids [7,8]

Como decíamos hace algunos años en [9], y parece que no ha cambiado mucho, excepto en que las herramientas de simulación han evolucionado bastante; esta materia, es una materia árida y difícil para los alumnos, con un alto índice de alumnos no presentados, por su carácter no lineal y requerir un conocimiento avanzado de matemáticas, con un alto grado de abstracción para entender el funcionamiento de las diferentes configuraciones de convertidores estáticos. Por otra parte esta materia necesita laboratorios específicos de costosa dotación y mantenimiento, y sigue siendo habitual, la realización de prácticas de circuitos de carácter básico, con un apoyo muy fuerte de software de simulación.

La simulación de circuitos electrónicos es una herramienta muy potente a utilizar en el proceso de aprendizaje, cuando se incorpora en los problemas planteados en clase y como preparación de las prácticas de laboratorio, pero puede ser un inconveniente la falta de manejo sobre todo para alumnos no familiarizados con la electrónica.

Tradicionalmente la simulación en electrónica de potencia ha sido y sigue siendo un pilar fundamental en la docencia de los convertidores de potencia; no tenemos más que mirar algunos de los textos que normalmente se utilizan como referencia bibliográfica en las clases, para ver que todos o casi todos incorporan como herramienta de ayuda y material didáctico los ficheros de simulación de la herramienta que hayan escogido (normalmente Pspice, Psim o Matlab) [10-15].

Existen distintas referencias donde se comenta distintos tipos de herramientas software que podemos encontrar enfocadas a la simulación de circuitos electrónicos de potencia [16-19]

Entre las herramientas más utilizadas podemos citar:

- Matlab: Simulink[1], Simscape Electronics, simulación de sistemas electrónicos y mecatrónicos[2] o Simscape Power Systems[3]
- Orcad-PSpice[4]: Actualmente comercializado por Cadence. Posiblemente uno de los simuladores más utilizados en estudios de ingeniería electrónica. La versión gratuita está limitada por el tamaño y complejidad de los circuitos a simular (normalmente suficiente para tareas docentes).
- NI Multisim[5]: Muy didáctico e intuitivo. Ahora propiedad de la empresa National Instruments, con la posibilidad de incorporar al circuito instrumentación virtual. Actualmente cuenta con una versión on-line muy interesante limitada en cuanto a funciones pero gratuita y disponible en cualquier navegador denominada Multisim-Live[6]
- LTspice IV: Simulador de circuitos electrónicos de alto rendimiento basado en Spice, de la empresa 'Linear Technology'. Con captura esquemática y visor de forma de onda, está disponible gratis. En la descarga se incluye una versión completa de LTspice IV, modelos macro para los productos de potencia de Linear Technology e incorpora una colección de circuitos demo [7][20]
- PSIM[8]: Es un programa específico para simulación de circuitos electrónicos de potencia y control de motores, hay una versión demo, que incorpora muchos circuitos de aplicación y la posibilidad de realizar nuestros propios diseños. Interface de fácil manejo con un manual de usuario muy detallado. Posee tres módulos independientes: Esquemático (SIMCAD), simulador (PSIM Simulator) y un entorno de visualización (SIMVIEW). Tiene varios módulos que extienden su funcionalidad como teoría de control, motores eléctricos, fotovoltaicos y turbinas eólicas, etc. Existe interface entre PSIM y MATLAB/SIMULINK, lo que lo dota de una gran potencia.
- Simplorer[9]: Disponible con una versión de evaluación. Es un versátil programa utilizado en automoción, electrónica de potencia y control de motores. Dispone de gran cantidad de ejemplos que pueden utilizarse en el aula
- Caspoc[10]: Excelente herramienta de simulación con la posibilidad de incorporar animaciones interactivas en las simulaciones realizadas, haciendo al programa muy didáctico y potente para su utilización docente.
- PLECS[11] (Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation): Herramienta de software para simulaciones a nivel de sistema de circuitos eléctricos desarrollados por Plexim. Está especialmente diseñado para la electrónica de potencia, pero puede utilizarse para cualquier red eléctrica

También es importante tener en cuenta las potentes herramientas que ponen a nuestra disposición los fabricantes de componentes electrónicos, permitiendo el diseño on-line con simulación incluida. La capacidad didáctica de ellas está todavía por demostrar pero, creemos que será el futuro de las herramientas a utilizar en clase. Por una parte nos ayudan en el proceso, pero por otra, acercan al estudiante al fabricante haciendo que se familiarice con los circuitos reales de que dispone. Podemos encontrar un listado de estas herramientas en el blog de PowerGuru [17], algunas de ellas se comentan en el cuarto apartado.

IV. Descripción de trabajo

Después de contextualizar este trabajo y la asignatura en la que se tratará de encuadrar, se puede ver como el tiempo del que se dispone para impartir los contenidos relacionados con los convertidores estáticos de potencia y la parte de fuentes de alimentación conmutadas es insuficiente para poder profundizar adecuadamente; por lo que es necesario plantear ideas globales sobre los conceptos y su aplicación práctica.

Dado el poco tiempo asignado y la falta de conocimientos previos en estas materias por los alumnos, es importante tratar de ver en la práctica, reflejados los conceptos elementales de convertidores DC-DC con sistemas electrónicos en funcionamiento desde el punto de vista de caja negra, bloque con entradas-salidas analizando las respuestas ante distintos estímulos de entrada; junto con la función de transferencia que relaciona dichas variables, esto permitiría ver implementado en la práctica, en un tiempo mínimo, las distintas configuraciones básicas analizadas y simuladas previamente;

[1] https://es.mathworks.com/products/simulink.html
[2] https://es.mathworks.com/products/simelectronics.html
[3] https://es.mathworks.com/products/simpower.html
[4] http://www.orcad.com/resources/orcad-downloads
[5] http://www.ni.com/multisim/esa/
[6] https://www.multisim.com/
[7] http://www.linear.com/
[8] https://powersimtech.com/
[9] https://www.ansys.com/products/systems/ansys-simplorer
[10] http://www.caspoc.com/
[11] https://www.plexim.com/

midiendo la señal de tensión y corriente bajo distintas condiciones de funcionamiento. Aprovechando la distribución de muy bajo coste de placas comerciales, podemos utilizar dichas placas como sistema electrónico para las prácticas de la asignatura. Solo hay que visitar algunos de los proveedores de internet más de moda en componentes y sistemas como son Amazon, Banggood o Alixprees, y teclear "convertidores DC-DC"

El estudio que se presenta tiene dos partes diferenciadas, por una parte analizar los software on line que ponen a nuestra disposición los fabricantes de dispositivos semiconductores y que nos pueden ayudar en las clases prácticas de convertidores DC-DC y por otra parte con un carácter experimental, la búsqueda de recursos de bajo coste que nos permitan agilizar y dinamizar las clases prácticas. Para este análisis práctico se utilizan tres tipos de recursos: (1) placas de prueba de circuitos integrados suministrados por los propios fabricantes, (2) placas didácticas para enseñanza práctica como las de Texas Instruments [21], y (3) montajes de placas DC-DC de muy bajo coste comerciales, como la placa LM2596 de Drok [22].

Desearíamos obtener unos resultados que nos muestren si son adecuadas para utilizarlas con fines docentes, y en su caso cuales de ellas son más aconsejadas.

A. *Software de simulación on-line de fabricantes de circuitos integrados*

En este apartado se comentan programas online de diseño de convertidores DC–DC ofrecidos por los propios fabricantes. En [17], podemos encontrar un listado de distintas herramientas en línea de ayuda al el diseño en electrónica de potencia.

- ✓ EdesignSuite de ST Microelectronics[12]

El programa indica paso a paso el posible diseño entre las opciones disponibles según nuestros parámetros de entrada. El simulador también dispone de un manual de ayuda, así como un video tutorial de inicio. Nos muestra los conversores que se ajustan a nuestra petición, así como las especificaciones de los mismos, enlaces a las hojas de características, esquemático y resultados de simulación con la respuesta temporal y frecuencial, como se puede apreciar en las figura 2.

- ✓ Texas Instrument(TI): Webench[13]

En la página inicial de TI encontramos una herramienta online llamada "WEBENCH" herramienta potente como ayuda de sistemas de alimentación de potencia, driver para led y sensores entre otros tipos de circuitos y aplicaciones. Dentro de los convertidores DC-DC, las siguientes topologías: Buck, Boost, Buck-Boost, SEPIC, Flyback[14]

Esta herramienta de simulación es una de las más completas y la consideramos muy adecuada para su utilización como herramienta didáctica en la universidad,

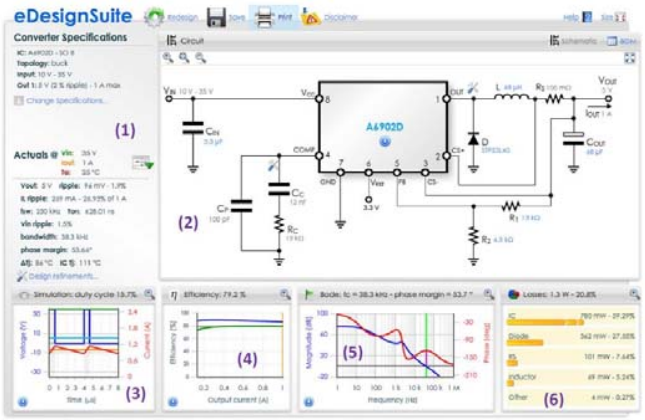


Fig. 2. eDesigSuite de ST Microelectronics (convertidor buck DC-DC))

- ✓ Maxim: EE-Sim Desing Tools[15,16]

Si bien este fabricante tiene herramientas de diseño offline así como diversas librerías para Pspice, CAD, etc; también tiene herramientas de diseño online como "EE-Sim Design Tools", un conjunto gratuito de herramientas en línea.

- ✓ Onsemi[17]

Onsemi ofrece en su página principal varias herramientas de simulación y análisis, entre las cuales se encuentran, iluminación LED o convertidores DC–DC. GreenPoint® Design Tools.

- ✓ Linear Technology[18]

Por último, para terminar este apartado, no podemos dejar de mencionar a Linear Technology parte de Analog Device por la gran cantidad de información que incorpora en su página Web, con videos y notas de aplicación que podemos utilizar en nuestras clases diarias. Linear pone a nuestra disposición la herramienta de simulación LTSice totalmente gratuita y de una gran potencia. Un simulador SPICE de alto rendimiento, captura esquemática y visor de forma de onda que facilitar la simulación de reguladores de conmutación. En este paquete se incluyen LTspice, Macro Models para la mayoría de los reguladores de conmutación de Linear Technology, más de 200

[12] http://www.st.com/content/st_com/en/support/resources/edesign.html
[13] http://www.ti.com
[14] http://www.ti.com/ww/en/university/docs/Intro-to-WEBENCH-PowerDesigner.pdf
[15] https://www.maximintegrated.com/en/ee_sim/
[16] https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/UG5861.pdf
[17] http://www.onsemi.com/
[18] http://www.linear.com/designtools/software/

modelos de amplificadores operacionales, así como resistores, transistores y modelos MOSFET.

La herramienta de diseño LTpowerCAD II de esta misma empresa es un programa completo de herramientas de diseño de fuentes de alimentación. La herramienta muestra los resultados en tiempo real de la gráfica de bode de bucle de realimentación, así como el rendimiento de la etapa de potencia. El diseño se puede exportar al circuito de simulación LTspice para que los usuarios verifiquen aún más sus diseños.

Además incorpora más ayudas como LTpowerPlay, Linduino, LinearLab Tools, una colección de programas de Matlab y Python, y Op Amp Online Design Tools, entre otras.

Como resumen de lo expuesto, aunque sin duda podemos encontrar, más herramientas on line podemos comentar con respecto a ellas que:

En Onsemi, podemos encontrar un software menos completo porque posee pocos convertidores entre los que elegir, siendo ambos reductores. Aunque como han comenzado hace poco, es de esperar que mejore con el tiempo teniendo en cuenta que este sitio Web se caracteriza por tener abundante documentación y muy utilizable con carácter docente.

Maxim, al igual que ocurría con el anterior la simulación on-line es bastante básica aunque tiene una mayor variedad de convertidores entre los que elegir, incluidos elevadores.

El software de ST es mucho más completo que los dos anteriores. Si bien el programa solo permite diseñar convertidores, reductores, hay una amplia variedad entre los que elegir según nuestras necesidades. La pantalla principal del simulador es mucho más intuitiva y se puede acceder a todas las funcionalidades de manera fácil y rápida.

El software de Texas Instruments es, junto al de ST el más completo. El catálogo para elegir convertidores es el más amplio de todos los estudiados. La pantalla principal del simulador es muy similar a la del de ST en cuanto a la estructura, aunque éste tiene algunas opciones extra. También permite hacer simulación térmica del circuito impreso diseñado.

B. Placas de evaluación de Circuitos integrados de fabricante

En la actualidad los distintos fabricantes suministran placas de prueba y evaluación de los distintos circuitos integrados que lanzan al mercado. Son placas de bajo coste que permiten probar estos circuitos y ver su funcionamiento. Estas placas al ser de bajo coste nos pueden permiten trabajar con ellas en las clases de prácticas de laboratorio con alumnos de cursos superiores. Ya vienen preparadas para establecer los distintos puntos de medida. Entre algunas de las placas analizadas podemos comentar:

- *Texas Instruments (Precio entre 7-25 Euros):*

✓ PTH08080WAH: Módulo reductor con entrada ajustable entre 4,5-18 V y salida ajustable entre 0,9-5,5 V a una corriente de salida de 2,25 A. con frecuencia de trabajo de 300 KHz y eficiencia del 91%.

✓ PTN04050C: Regulador de tensión tipo Boost

✓ AN-1965 LM25011 EVALUATION BOARD: Tipo Buck con LM25011.

- *Onsemi (Precio entre 30-100 Euros):*

✓ MC34063LBGEVB: Tipo Boost con CI MC34063A. Entrada 3-40 V y una salida variable a una corriente de 1,5 A. Frecuencia de trabajo de 100 KHz.

✓ NCV8842PWGEVB: Tarjeta de evaluación tipo Buck

- *ST(Precio entre 8-40 Euros):*

✓ EVAL4971: Módulo tipo Buck sencillo con un rango de tensión de entrada de entre 8 y 55 V y un rango de tensión de salida de entre 3,3 y 50 con una corriente de 2,5 A. frecuencia de conversión de 300 KHz con una eficiencia del 86%

✓ EVAL5972D: Tipo BUCK con el CI L5972D

✓ STEVAL-ISA088V1: Placa de demostración tipo Buck que hace uso del L5970D.

- Maxim (Precio entre 3-70 Euros):

✓ MAXREFDES33: Módulo tipo BUCK con tensión de entrada de entre 4,5-60 V y una tensión de salida fija de 3,3 V a una corriente de 0,3 frecuencia de conversión de 500 KHz con una eficiencia del 86%

✓ MAXM17544EVKIT: Módulo Buck.

✓ MAX1771EVKIT: Módulo Boost.

C. Placas de experimentación didácticas de fabricante

Comentaremos dos placas de experimentación de bajo coste de la serie TI Power Management Lab. Kit de Texas Instrument, con un precio muy asequible de aproximadamente unos 90 Euros, sobre convertidor Buck (PMLK Buck) [21] y la placa Boost (PMLK Boost) [23]. Los extensos manuales que acompañan a las placas de experimentación han sido realizados por el Profesor Nicola Femia[19] de la Universidad de Salerno e incorporan gran cantidad de documentación didáctica y manejo de las placas [24,25] con experimentos que abarcan distintas pruebas para distintas condiciones de funcionamiento.

- Placa experimentación PMLK Boost

Está basada en dos convertidores elevadores integrados, el convertidor TPS55340 con un rango de tensiones de entrada entre 5 y 12 V y una tensión de salida fija de 24 V a 0,6 A. y el convertidor LM5122 con un rango de tensiones de entrada

[19] http://www.elettrotecnica.unisa.it/persone/per_femia

entre 9 y 20 V y una salida fija de 24 a 2A. de máxima corriente de carga.

Esta placa nos permite hacer distintas medidas en modos de funcionamiento con corriente continuada y discontinua; se observan los efectos que tienen la corriente de carga, la tensión de entrada, la frecuencia de funcionamiento y lazos de realimentación; se analizan los fundamentos teóricos del sistema de control del convertidor LM5122.

En la figura 3 apreciamos la placa físicamente, en la que se puede ver en la parte superior el circuito el CI TPS55340 y en la parte inferior el CI LM5122. En la figura 4 representamos el esquemático del convertidor Boost con el circuito integrado TPS55340



Fig. 3. Placa experimentaciój de Texas Instruments TI-PMLK Boost Experiment Board (TPS55340 & LM5122)

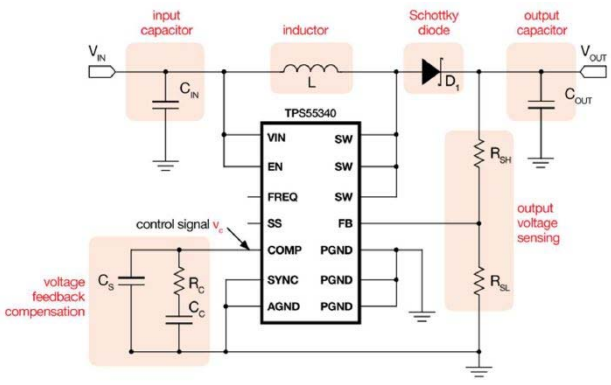


Fig. 4. Esquema del circuito de potencia de la parte superior de TPS55340 del Boost Experiment Board de Texas Instruments

- Placa experimentación PMLK Buck

La placa PMLK Buck está basada en dos convertidores reductores integrados, en la parte superior tenemos el convertidor LM3475 con un rango de tensiones de entrada entre 5 y 10 V y una tensión de salida fija de 2,5 V a 2 A de máxima corriente de carga; en la parte inferior el convertidor reductor TPS54160 con un rango de tensión de entrada entre 6 y 36 V y una salida fija de 3,3 a 1,5 A de máxima corriente de carga.

En la figura 5 aparece la placa de circuito impreso de convertidor reductor con el CI LM3475, y sus distintos puntos de prueba y jumper de configuración. Y en la figura 6 las formas de onda de la tensión y corriente para corriente continuada con una frecuencia de conmutación de 500 kHz.

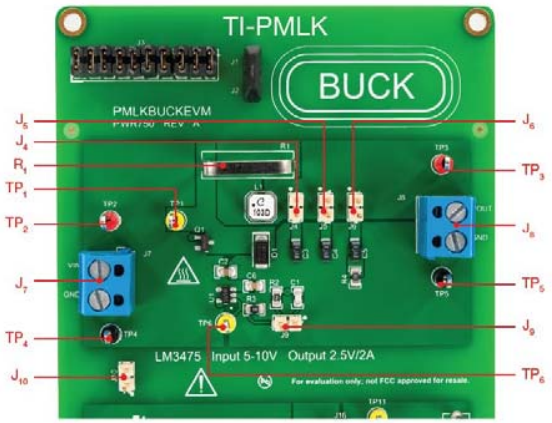


Fig. 5. Placa de circuito impreso con sus puntos de prueba del convertidor Boost de la placa experimentación PMLK BUCK con CI LM3475

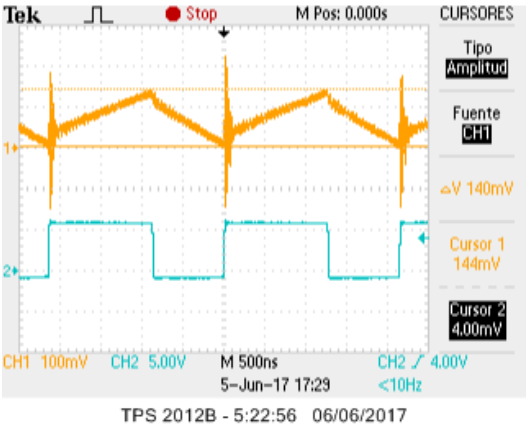


Fig. 6. Tension en extremos de la bobina y coriente por el convertidor

BUCK LM3475, con corriente continuada.

D. Placas de convertidores comerciales de muy bajo coste

- DROK LM2596 Ajustable. Regulador de Voltaje Buck[20]

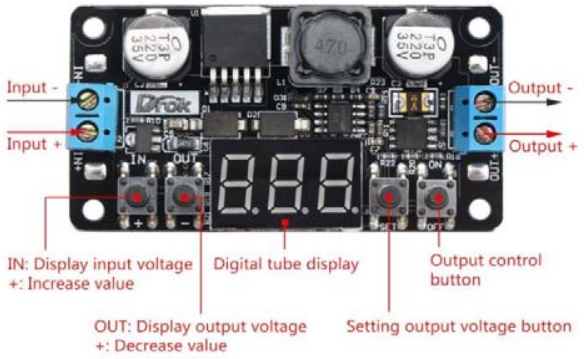


Fig. 7. DROK LM2596 Ajustable. Regulador de Voltaje Buck

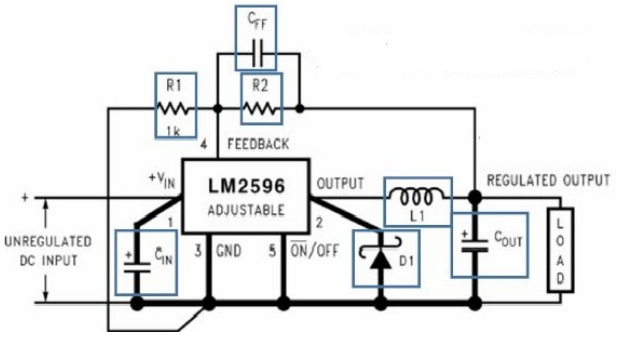


Fig. 8. Diagrama esquemático de DROK LM2596 Ajustable. Regulador de Voltaje Buck

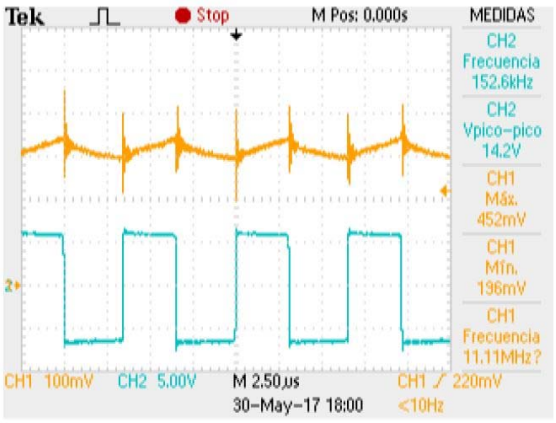


Fig. 9. Formas de onda de la tensión y corriente de DROK LM2596 Ajustable

[20] http://www.droking.com/

Éste es un regulador tipo Buck que hace uso del CI LM2596 de Texas Instruments [26]. Como extras, posee una pequeña pantalla con displays siete segmentos que muestra la tensión de entrada o de salida según los pulsadores IN/OUT. Los otros dos pulsadores modifican el valor de la tensión de salida (precio aproximado de 9,50Euros).

Las especificaciones de este conversor son las siguientes: Tensión de entrada Vin con rango de 5-35 V, tensión de salida Vout ajustable entre 0 y 30 V, corriente de salida máxima de 3A, aunque para largos periodos de funcionamiento debe limitarse a 2A. En la figura 7 podemos ver la placa del convertidor buck correspondiente al esquema que muestra la figura 8 en la que se ha experimentado y tomado algunas señales; en la figura 9 que se aprecia la tensión en extremos dela bobina y corriente tomada en extremos de una resistencia shunt.

Se midió el rendimiento experimental para valores de Vin de 6 y 24v. salida fija de 3,3v y resistencias de carga de 2,2 a 33 Ohm. Dando nos resultados de rendimientos comprendidos entre 66-84%

- DROK LM2577 Ajustable. Regulador de Voltaje Boost

Es un regulador tipo Boost que hace uso del convertidor LM2577 [27] de Texas Instruments. Con tensión de entrada Vin de entre 3 y 34 V. tensión de salida Vout ajustable entre 4 y 35 V. corriente de salida Iout máxima de 2,5, display siete segmentos en el que muestra la tensión de entrada o de salida según el pulsador IN/OUT (precio aproximado de 10 Euros).

En la figura 10 podemos ver el esquemático básico corrrespondiente.

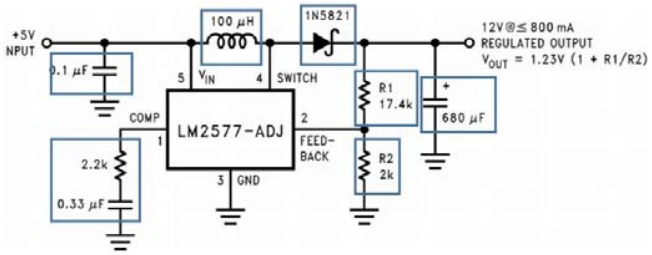


Fig. 10. Esquema báscio de la configuración de Placa DROK LM2577 Ajustable.

- EVBOARD con LM2596:

Módulo reductor con entrada ajustable entre 4,5-35 V y salida también ajustable entre 1,5 y 35 V con una corriente de salida de 2 A. Pensado para trabajar a una frecuencia de conversión de 150 KHz a con una eficiencia del 93%. Placa cerrada con puntos solo para entrada y salida de tensión. Precio aproximado de 1 Euro



Fig. 11. Placa de EVBOARD con LM2596:

- Módulo LM2596 Arduino Nano/Uno/Mega

De características prácticamente similares al EVBOARD com LM2596. regulador tipo BUCK que hace uso del mismo convertidor de Texas Instruments (precio aproximado de 4,35 Euros)

- Sodial(R) Regulable LM2596

Éste es un regulador tipo Buck que hace uso del convertidor LM2596 de Texas Instruments. Muy similar a los anteriormente presentados (precio aproximado de 4 Euros)

Las especificaciones de este conversor son las siguientes: Tensión de entrada Vin de entre 4 y 40 V., tensión de salida Vout ajustable entre 1,25 y 37 V. La tensión de salida siempre debe ser al menos 1,5 V inferior a la de entrada, corriente de salida Iout máxima de 2 A.

En la actualidad hay cantidad de recursos didácticos como videos en distintos canales comentando y dando información sobre los circuitos presentados, basta como muestra ver las referencias presentadas [28-30].

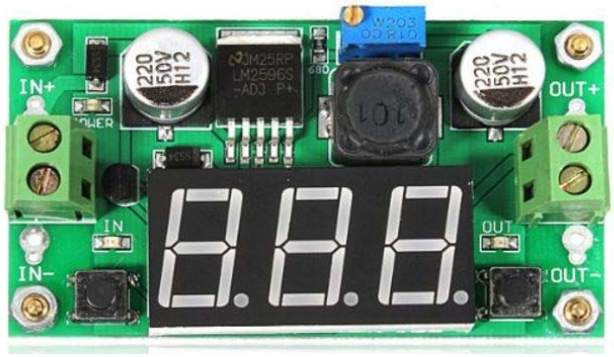


Fig. 12. Placa Sodial(R) Regulable LM2596

V. CONCLUSIONES

Dado las características particulares de algunas asignaturas en los distintos planes de estudio, con un gran contenido y poco tiempo para poder desarrollarlo, hemos de presentar al alumno los principales conceptos relacionados con la materia de una manera práctica y acercarlo al mundo real a través de los distintos fabricantes de circuitos.

Se ha presentado una muestra de software on line que nos facilitan los fabricantes de circuitos integrados y que podríamos utilizar como herramientas docentes para nuestras clases teóricas y prácticas.

Las placas de evaluación de circuitos de fabricantes pueden servir para experimentar en el aula y puede ser un recurso útil, sencillo y barato para emplear en cursos superiores. Solo hay que entrar en las distintas páginas de los fabricantes para ver la cantidad que se encuentra.

Los fabricantes de circuitos empiezan a suministrar placas de experimentación para docencia y uso en laboratorio de electrónica aportando mucha información y manuales muy extensos. Esto nos permite disponer de una herramienta de gran utilidad para nuestra docencia en la parte práctica de laboratorio; con la ventaja de ser unas placas ya preparadas con los distintos puntos de prueba.

Y por último el gran avance en la venta on line permite poner a nuestra disposición en un "click" cantidad de recursos de muy bajo coste que podríamos utilizar para el laboratorio con los alumnos, como es el caso de placas DC-DC. En la actualidad están en continua evolución y aparecen nuevas aplicaciones día a día.

Es necesario seguir investigando en distintos recursos, herramientas y sistemas electrónicos que podríamos aplicar a nuestra docencia diaria en el aula relacionado con él área que nos ocupa. Realizando un estudio pormenorizado de la incidencia que puede tener la utilización de éstas sobre el rendimiento académico.

En este curso 2017-2018, se ha iniciado la experimentación con alumnos de master y alumnos repetidores de grado, no habiéndose encontrado una solución satisfactoria en el empleo de placas de muy bajo coste, al aparecer algunas dificultades como por ejemplo acceso a los distintos puntos de medida, en extremos de la bobina o corriente por la misma, descripción completa del circuito de potencia, etc. Seguimos trabajando para ver las posibilidades de utilización.

Por último, si destacaremos el gran potencial de las placas de experimentación presentadas anteriormente de Texas, Buck y Boost, por la sencillez de uso y el precio relativamente económico que tienen, junto con la gran cantidad de documentación que aportan.

En el curso 2018-19 se tratara de realizar una guía docente variando la que hay en la actualidad en la que solo se incluye simulación con Pspice para la parte práctica, que incluya los recursos planteados y distribuidos en clases de teoría y prácticas, tratando al final del mismo de evaluar la incidencia sobre el desarrollo de la asignatura. Se realizara un estudio de la tasa de éxito, rendimiento y no presentados, comparada con cursos anteriores. Realizaremos unas encuestas de satisfacción a los alumnos para ver el grado de aceptación.

REFERENCIAS

[1] M.I. Muñoz y J.I. García, " Aprendizaje de Electrónica de Potencia basado en competencias en el Esapcio Europeo de Educación Superior", IEEE-RITA Vol2, Núme.2,Nov.2007.

[2] M.A.Zabalza, "La enseñanza universitaria. El escenario y sus protagonistas", Madrid: Narcea, 2002.

[3] A. Parcerisa, "Materiales para la docencia universitaria. Orientaciones para elaborarlos y mejorarlos", Barcelona: Octaedro, 2005.

[4] M.A.Zabalza, "Competencias docentes del profesorado universitario. Calidad y desarrollo profesional", Madrid: Narcea, 2003.

[5] Memoria Master de Ingeniería Industrial de la Escuela Politécnica Superior de Jaén. [On line 2/2/2018 en : http://eps.ujaen.es/masterInd/masterInd_presentacion.html]

[6] Orden CIN/311/2009, de 9 de febrero, por la que se establecen los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Industrial. BOE" núm. 42, de 18 de febrero de 2009, páginas 17187 a 17191 [On line 25/2/2018 en : https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2009-2740]

[7] M.H.Rashid, Electrónica de Potencia: Circuitos, dispositivos y Aplicaciones. Prentice Hall. 2004

[8] B. K. Bose, "Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy Systems," in Proceedings of the IEEE, vol. 105, no. 11, pp. 2011-2018, Nov. 2017.

[9] J.D.Aguilar, " Electrónica de potencia: Reflexiones sobre la docencia y herramientas de apoyo" Tecnología Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica. TAEE 2014 [on line 20/2/2018 en http://e-spacio.uned.es/fez/view/taee:congreso-2004-1077]

[10] N.Mohan at al. Power electronics. Converter apllicatins and desing. John Wiley & Sons. Third Edition. 2003

[11] N.Mohan. Educational Laboratories. [On line 4/2/2018 en: http://people.ece.umn.edu/~mohan/labs.html]

[12] M.H.Rashid,Spice for power electronics and electric power, Prentice Hall.1993.

[13] Hart, D.W., Electronica de Potencia. Prentice Hall 2001

[14] R.Erickson,W.Maksimovic. Fundamentals of Power Electronics. Springer. 2001

[15] R.Shaffer,Fundamentals Of Power Electronics With Matlab, Charles River Media, 2006

[16] Blog de C. Sánchez. Escuela Politécnica Cuenca. [Online 1/2/2018 en https://blog.uclm.es/cesarsanchez/2017/10/29/software-de-simulacion-electronica/]

[17] "Power Electronics Design, Simulation, and Analysis Tools" PowerGuru. [On line 25/2/2018 en: http://www.powerguru.org/power-electronics-design-simulation-analysis-tools]

[18] Neha Maithil et al. Simulation Tools for Power Electronics-"An Overview", International Journal on Emerging Technologies 4(1): 104-107(2013)

[19] A. Rodriguez, Weinstein y P. Lezana, "A Comparison of Power-Electronics Simulation Tools" EE Times [On line 25/2/2018 en : https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1275977]

[20] G.Alonso, What's New with LTspice IV? http://cds.linear.com/docs/en/lt-journal/LTJournal-V25N3-04-di-LTspice-GabinoAlonso.pdf

[21] Texas Instaruments. TI-PMLK Buck Experiment Board using TPS54160 & LM3475 [on line 15/1/2018 disponible en: http://www.ti.com/tool/PMLKBUCKEVM]

[22] DC to DC Buck Converter Step Down Voltage Regulator Sheet [On line 1/2/2018 disponible en; http://www.droking.com/]

[23] Texas Instruments. TI-PMLK Boost Experiment Board using TPS55340 & LM5122 [On line 1/1/2018 disponible en: http://www.ti.com/tool/PMLKBOOSTEVMB]

[24] Texas Instaruments. PMLK Buck Experiment Book [On line 1/2/2018 disponible en: http://www.ti.com/lit/pdf/ssqu007]

[25] PMLK Boost Experiment Book (Rev. A)[On line 1/1/2018 disponible en: http://www.ti.com/lit/pdf/ssqu008]

[26] LM2596 SIMPLE SWITCHER® Power Converter [On line 1/1/2018 disponible en: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf]

[27] LM1577/LM2577 SIMPLE SWITCHER® Step-Up Voltage Regulator.] On line 4/2/2018 en: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2577.pdf]

[28] Review of the DROK® Micro Electric DC/DC Step-up Voltage Converter. VisdeoYoutube [On line 1/32/2018 disponible en: https://youtu.be/XmK7GO3a650]

[29] Fuente de alimentación conmutada de Step Down. Video de Youtube [On line 1/1/2018 disponible en: https://youtu.be/4psC-FA8up4]

[30] Humberto Higinio. DC to DC Converters - Modulos Step Up - Step Down - Parte1. Video Youtube [On line 1/1/2018 dispononible en: https://youtu.be/64uAnnLWgCI]

An approach to Inclusive Education in Electronic Engineering Through Serious Games

Angel Jaramillo-Alcázar
Facultad de Ingenierías y Ciencias Aplicadas, Universidad de Las Américas, Quito, Ecuador
angel.jaramillo@udla.edu.ec

Carlos Guaita
Facultad de Ingenierías y Ciencias Aplicadas, Universidad de Las Américas, Quito, Ecuador
carlos.guaita@udla.edu.ec

Jorge L. Rosero
Facultad de Ingenierías y Ciencias Aplicadas, Universidad de Las Américas, Quito, Ecuador
jorge.rosero@udla.edu.ec

Sergio Luján-Mora
Department of Software and Computing Systems, University of Alicante, Alicante, Spain
sergio.lujan@ua.es

***Abstract*—The development of video games has had a great growth in recent years. Also, serious games have positioned themselves as a tool that support the learning process of students. Students from electronic engineering are not the exception. However, video games of this type do not usually consider accessibility parameters in their design and those for electronic engineering are not the exception. On the other hand, several educational institutions use mobile devices in their classrooms for a more didactic learning and to achieve better learning outcomes. This article proposes a mobile serious game that addresses some basic principles of electrical circuits. Also, it incorporates accessibility features for students who have hearing or visual disabilities. Experiments were carried out with people with these types of disabilities to validate their accessibility and they were evaluated to verify their level of learning. Finally, the results obtained were analyzed in order to improve the video game.**

***Keywords*—Electronic engineering education, serious games, impairments, disabilities, mobile devices, accessibility, inclusive education.**

I. Introduction

People with disabilities have grown in number around the world. Approximately one billion people live with some type of disability, it is about 15 % of the world population [1]. In addition, in 2010 around 360 million people had disabling hearing loss [2] and 285 million people had some kind of visual impairment [3]. All of them need equal conditions in their lives. Hearing and visual impairments are the two main disabilities related to the senses and this affects the perception and reception of information during learning. Hearing loss in learning may affect the students' speech and language skills and also their vocabulary development [4].

The number of people with disabilities has led to initiatives that promote accessibility as a key feature in the world around us. In serious games, accessibility is also an important feature. This is a category of video games designed with the purpose of supporting the educational process [5].

Serious games are being applied in different knowledge areas: medicine [6], engineering [7], training and education [8], programming [9], business and industry [10], nursing education [11], among others.

Accessibility is the ability of an object to be used in spite of the condition or disability of a person [12]. In video games, accessibility is a factor that is beginning to be considered by software developers. Nevertheless, there are several players with disabilities. It is the case of Chris Robinson [13], Sven Van de Wege [14] and Ben Breen [15], better known as Phoenix, Blind Warrior and Sightless Kombat respectively. All of them are fighting game players. Chris is deaf and Sven and Ben are blind. These cases exist because some video games are accessible to people with different disabilities. However, these are only exceptions.

According to [16], there are four grades of hearing impairment based on a decibel scale representing hearing loss:

- Slight/mild hearing loss (26 - 40 dB).
- Moderate hearing loss (41 - 60 dB).
- Severe hearing loss (61 - 80 dB).
- Profound hearing loss (over 81 dB).

People with mild, moderate and severe hearing loss are grouped under the term *hard of hearing*; whereas people with profound hearing loss are *deaf*. Both, hard of hearing and deaf together represents the total number of cases of hearing impairments [2].

Also, in [17], the visual function is divided into four levels:

- Normal vision.
- Moderate visual impairment.
- Severe visual impairment.
- Blindness.

Both, moderate visual impairment and severe visual impairment, are grouped under the term *low vision*; low vision and blindness together represents the total number of cases of visual impairments related to vision loss [3]. Another vision alteration is *color blindness* which is defined as inability to detect certain colors or not perceive clear differences between red and green or yellow and blue correctly [18]. The person perceives the world as shades of gray.

People with Intellectual Disabilities (ID) have troubles and barriers to get a job. Some tools based in serious games for reeducation and diagnostic of cognitively impaired persons, have been developed [19]. Also, in [20] explains the design and evaluation of 10 games that supports people with learning disabilities and additional sensory impairments to prepare themselves to deal with situation at work, such as money

management, traveling independently, etc. The games were tested in collaboration with three countries: UK, Lithuania and Hungary. Some aspects that this project take into account in the Game is a 3D virtual reality environment using an avatar and a Britain Sign Language (BSL).

Nevertheless, a normal range intellectual quotient (IQ) can be found in children with learning disabilities, however they need that teachers and parents are concerned about their capabilities to help them with new and modern didactic material to improve their skills. A web based system tool that help children from kindergarten and early primary with learning disabilities, to know and improve their IQ, is presented in [21]. Based in a IQ test, the systems identify which disability category the child falls and assigns special games to play to overcome his disability. Then, the child is asked to do the test again to check if there is a learning improvement.

On the other hand, during Goal Net Project the use of serious games with three different classrooms of students with intellectual disability was carry out. Topics such as time and stress management, preparation before the first day at a new job, personal hygiene, job related quizzes, etc, were introduced [22]. Furthermore, the EPINOSI Project with tests for a period of two years, educators supported students with mild intellectual disability on the subject of serious games and new technologies. A specialized training program for primary, secondary and special education, with more than 400 teaching hours, was realized. The authors identified that the educator act as a researcher, as an facilitator and as a fellow-gamer.

In the field of serious games applied to engineering education, a practical example and case study of using Learning Mechanics - Game Mechanics (LM-GM) to evaluate the student retention is presented in [23]. A game, with a competitive leader board element, analytics and a level of user engagement and re-playability, is designed using a commercial game engine (Unity3D) to prototype simulations. This project seeks to increase student engagement through the compelling, engaging, immerse and competitive environment to teach advanced electronic/electrical circuit theory. They motivate to students to apply their knowledge and understanding of circuit theory of electronic circuits successfully to complete the game. The game include seven difficult levels, based in fundamental electronic and electrical circuits learned in the first year undergraduate engineering courses. Additionally, it is a deployment on mobile devices with touch capabilities using a first person perspective and viewpoint. The results obtained reveal that core analytics allow the measurement of student engagement/retention levels, based in the number and time of levels passed by the player (student). Educator can use this game like a tool to quantify the effectiveness of the learning activities.

Furthermore, this work focus on teaching digital electronic systems to students of the second year of electronics engineering, using serious games. A game designed by cases and difficult levels was used. Social networks like Google, were used to test the mini games that consist in little study cases related to specific topics like units system conversion, logic gates simbology and operation, simple logic gates connection and true tables [24].

In spite of efforts that has been made in create and develop serious games, still exist a gap in the accessibility field [25]. The gap can be reduced through the application of serious games in mobile devices and focused to education on people with some disability [26], for example people with visual impairments [25].

The Ohm's law is a basic principle that every student of electronic engineering must understand. Considering this, it is important to apply a different teaching mechanism, through a serious game, to teach the concepts related to this law. This paper proposes a serious game to teach the elemental concepts of electricity: current, voltage and resistance for students of electronic engineering. Also, some features of accessibility for people with hearing and visual impairments are presented.

The rest of this article is organized as follows. In section II, we design GameOhm app with accessible features. Next, in section III, we describe the game evaluation with electronic engineering students. In section IV, we analyze the results of the evaluation. Finally, in section V we conclude the research and we outline our future works.

II. GameOhm Application Design

In this section we describe the video game design and the guidelines considered for people with hearing and visual impairments. There are many authors that propose accessibility guidelines. This authors, in most part, belong to video games development groups. They focus their research on define features that provide the opportunity for people with disabilities to enjoy video games. This contribution is focused in improve the accessibility and offers the possibility of learning through serious games.

In previous works, we have studied some methods that assess the the accessibility of mobile video games for people with motor [27] and cognitive [28] impairments. Also, in [29] and [30] we described and consolidated some guidelines for people with hearing and visual impairments. We defined a guidelines categorization too. Now, we had considered some of that guidelines for the development of this version of GameOhm video game: simple language, customize font type, customize font size, high contrast colors, subtitles and sign language. The latter is an important feature that is beginning to be used. In [31], for example, the video game protagonist is a mouse that uses sign language.

One of the principal aspects in designing any technological solution is the definition of the different actors that will interact with the system. Thus, the actor identified for GameOhm is *Engineering student*. This actor is the electronic engineering student that will use the mobile application to learn basic concepts about Ohm's law: voltage, current and resistance. The functional and no functional requirements that were defined are shown in Table I and Table II, respectively.

All these requirements will be used to define the video game functionalities. Customize font type and size allows the player with hearing or visual impairment a readability,

Table I
FUNCTIONAL REQUIREMENTS

Requirements	Description
Learn electric voltage	The video game should support the user to learn the concept related to voltage.
Learn electric current	The video game should support the user to learn the concept related to current.
Learn electric resistance	The video game should support the user to learn the concept related to resistance.
Accessibility settings	The video game should support the user to customize font type and size and change colors of the games.
Sign Language	The video game should support the user to receive the instructions with sign language.

Table II
NO FUNCTIONAL REQUIREMENTS

Requirements	Description
Android Platform	The app should run over a device with Android 4.0 or later.
Usability	The mobile application should be intuitive, easy to use and understan and implement accessibility strategies for people with hearing and/or visual impairments.
Reliability and robustness	The system must be reliable and robust to user errors.

reduce eye strain, and help keep the gamer informed of the environment. On the other hand, sign language allows to a player with auditory impairments to understand the video game instructions.

The mobile video game was designed with Unified Software Development Process or Unified Process (UP) methodology [32]. It is based on use cases to obtain a reliable and scalable system architecture. UP uses Unified Modeling Language (UML) [33] for the representation of several architectural aspects of the application. In the design of the GameOhm video game, we have considered some artifacts like: use case diagrams, sequence diagrams, logical architecture and navigability diagrams using UML.

1) Use Cases: The use cases identification is the first step in the video game design. Use cases will capture the functional requirements and their relationships with the video game users. Figure 1 shows the use cases and their association with the video game user.

2) Sequence Diagrams: Furthermore, the sequence diagrams describe in detail the steps that the user must follow to execute the different use cases. Figure 2 shows the sequence diagram for the accessibility features configuration. It explains the process to be followed by the user to change the font type, the font size or if the high-contrast version is desired.

3) App Architecture: The definition of the architecture should be able to support the execution of all the processes described in the sequence diagrams. This will allow the development of all previously defined use cases. Thus, the Model View Controller (MVC) design pattern will be taken into account. This design pattern will facilitate the implementation of the resulting design code and provide a high degree of scalability to the application.

Figure 3 shows the architecture of the mobile app. Each

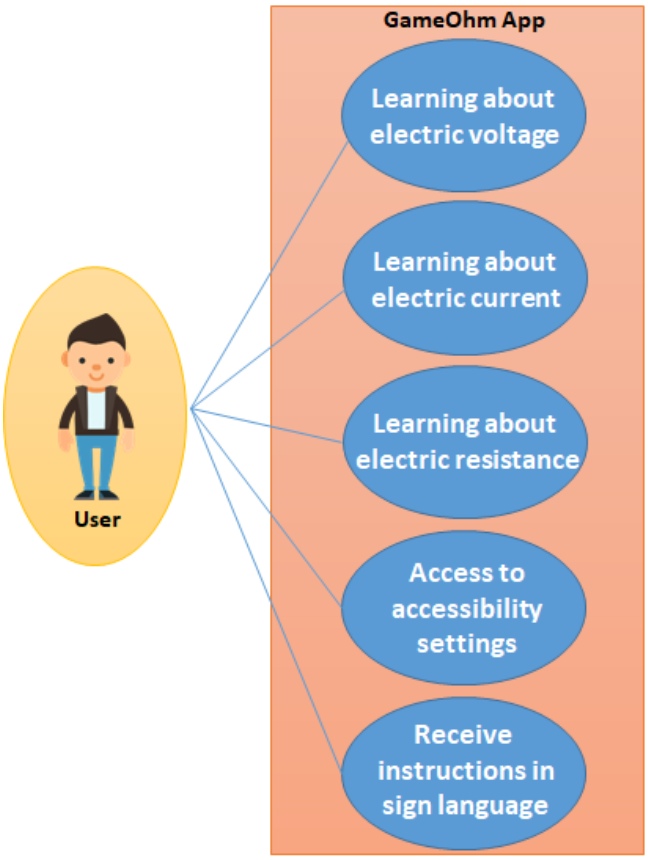


Figure 1. GameOhm Use Cases

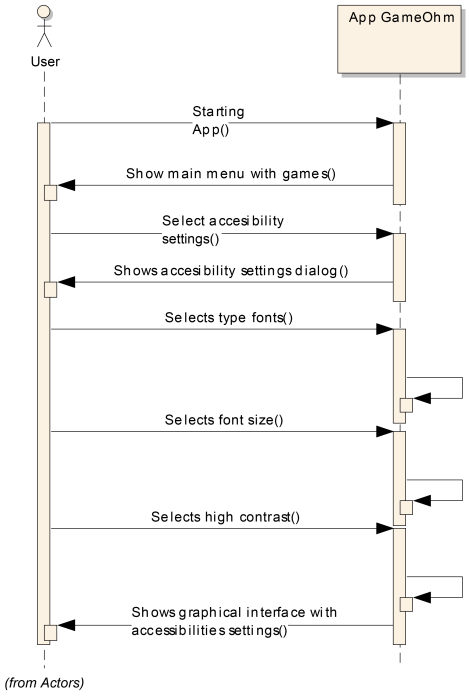


Figure 2. Accessibility Features Sequence Diagram

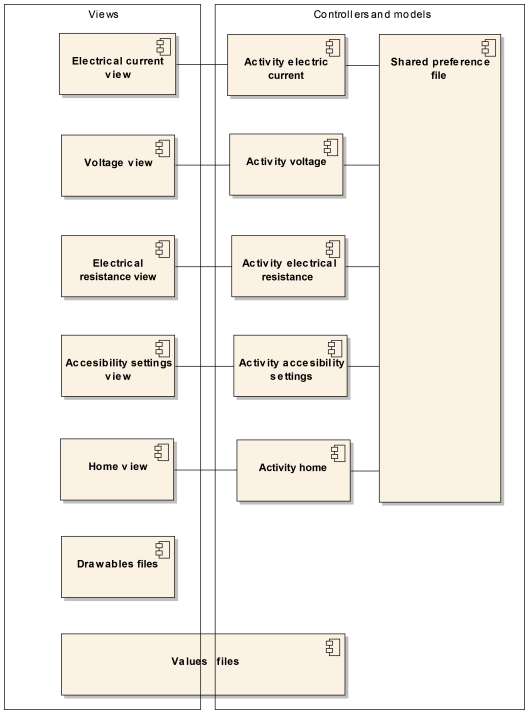


Figure 3. MVC Architecture

block represents a programming system component and also we can see the relationship between each one. Also, it shows the transversability of some of them when it is used by more than one component in the application.

4) App Navigation: The navigability that the application will have between the different modules is presented in Figure 4. Each module can access the others except the accessibility module, which will be accessed only through the main menu screen.

III. GameOhm Review and Students Assessment

Once the mobile video game was developed, some tests were carried out with first semester students of electronic engineering.

Likewise, GameOhm app was installed on six Samsung Galaxy Tab S2 with Android Marshmallow 6.0.1. They were used by twenty-two students in a sixty-minute evaluation session. In Figure 5, we present some screen captures of the final version used by the students. The upper left capture corresponds to the initial screen of the game where a selection menu of the three games is presented.

In the lower left capture, we present the game of electric current. In red circles are the electrons that should be placed on the conductor in yellow. The formula for calculating the current is presented, where q is the number of electrons and t is the unit of time. Depending on the number of electrons and the set time, the current that circulates on that conductor varies.

The upper right capture corresponds to the voltage game. The game explains the difference in potential measured in two

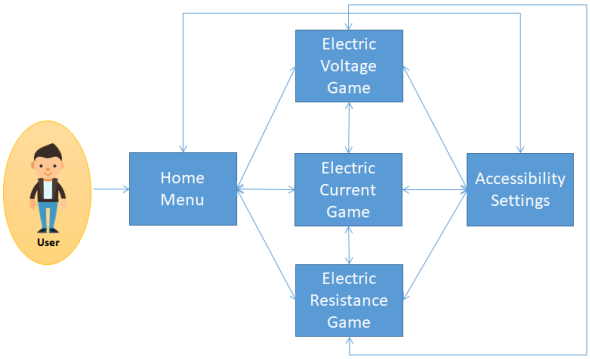


Figure 4. App Navigation

points. The student can set the potential value at each point and observe how the total voltage value varies based on this.

At the bottom right we present the resistance game. This set allows to vary the characteristics of the conductor cable as its length or thickness. The value of the resistance obtained in ohms is calculated through the formula.

In all games, a video with the description and the instructions of the corresponding game in sign language is presented. Also, at the bottom of each game, the subtitles are displayed in a simple language understandable to the students. In the right top of all screens there is the button for configuring the accessibility parameters as we can see in Figure 6.

Once the students played GameOhm after a general explanation of the video game, we proceeded to perform a knowledge assessment with three questions about the basic principles

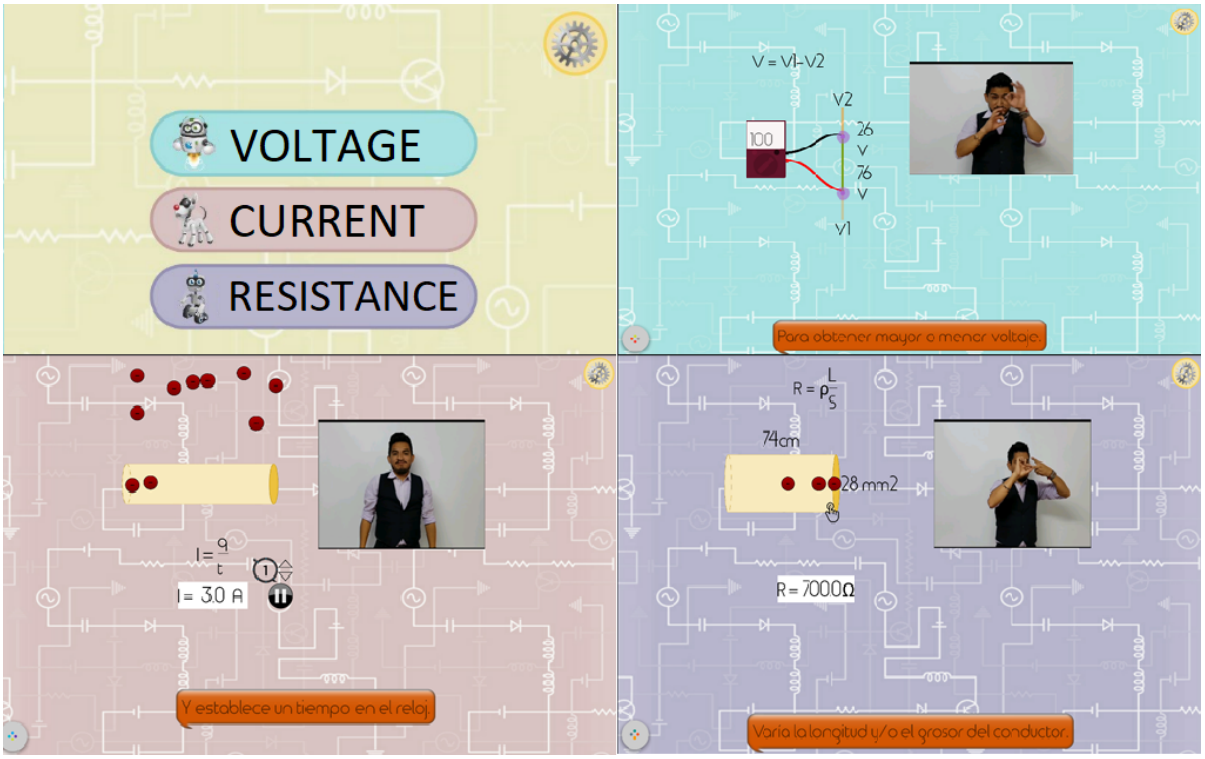


Figure 5. GameOhm Screen Captures



Figure 6. GameOhm Accessibility Features

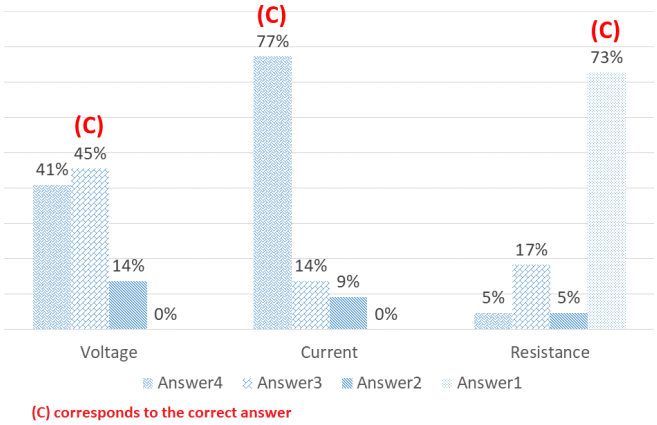


Figure 7. Students Assessment Results

of electronics such as: Voltage, Current and Resistance. The results obtained by the students can be seen in Figure 7. In red is showed the correct answer of each question (C).

IV. Discussion of Results

This mobile video game is aimed at reinforcing the basic knowledge of electronics engineering, in this case Ohm's law. We have some considerations about the learning assessment about the three main topics covered in the game: resistance, voltage and current.

In the first question, related to the concept of Resistance, the 73 % of responses are correct. Also, in the question about Current, the 77 % of the students answered correctly. In both cases, this result could be represent that the two concepts were assimilated correctly.

On the other hand, in the third question about voltage, just the 45 % of responses are correct. It could mean that more than the half of students did not understand the concept related to voltage and maybe it is needed to improve the content presented. Another alternative could be to consider a different logic for the voltage game, taking into account an example that clarifies the concept in question.

The mobile video game also presents accessibility features

for people with hearing and visual impairments as we can see in Figure 6. This is a relevant characteristic for those people that have troubles in their vocabulary development due to their hearing loss. In Figure 8, for example, we can appreciate the high contrast configuration and subtitles of the resistance game.

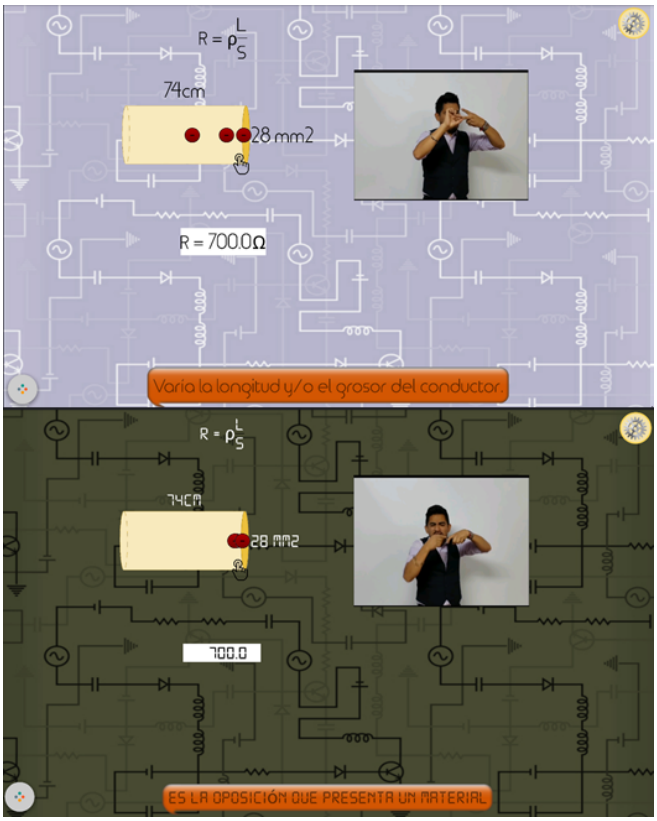


Figure 8. High Contrast Configuration

V. Conclusions and Future Work

This research tries to support the learning process in engineering students, specially from the electronic area and for people with hearing and visual impairments. Serious games development has growth and is important to consider accessibility parameters in their design and implementation. The use of non-accessible serious games goes against the Article 24 - Education of the United Nations Convention on the Rights of Persons with Disabilities [34], considering that avoids people with impairments having access to education on equal terms with a person without disabilities.

Every area related to engineering education has his own particularities and they need to beef up some specific topics that are essential in their knowledge area. Ohm's Law is a basic principle that every student of electronic engineering must understand and dominate. The results obtained in the evaluations show evidence that there was learning by the students. However, it is necessary to apply more specific evaluations to have more accurate results.

The use of mobile devices has increased in recent years. This has given way to the development of applications for teaching purpose. The proposed mobile video game tries to support the learning process in students of elemental electronic. Also, it incorporates accessibility features that could be set by students with hearing or visual impairments. It is important to consider that, as with oral language, there is not necessarily a unique sign language for everyone, and even less is a universal language. There are different sign languages in the world, located regionally.

In the development of the application and while the translations to sign language were done, the application was slightly tested by a couple of deaf students generating a high interest and acceptance in them. However, the next step in our research will be to conduct usability tests with students with hearing or visual disabilities. This will allow us to assess the effectiveness of the features incorporated in the video game. There are other features that could be included in a new version of GameOhm. The long-term objective is to propose a mobile video game totally accessible for people with hearing and visual impairments and/or other disabilities.

Acknowledgment

We thank the faculty of the *Instituto Nacional de Audición y Lenguaje* for their support in the translation into sign language of the different descriptions of the video game presented.

References

[1] World Health Organization, "World report on disability," 2011.
[2] ——, "Deafness and hearing loss," 2017. [Online]. Available: https://goo.gl/35F73p
[3] ——, "WHO — Visual impairment and blindness," 2016. [Online]. Available: http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs282/en/
[4] National Research Council (US) Committee on Disability Determination for Individuals with Hearing and Dobie, Robert A. and Hemel, Susan Van, "Hearing Loss in Children," 2004. [Online]. Available: https://goo.gl/4XQTHi
[5] D. R. Michael and S. L. Chen, *Serious Games: Games That Educate, Train, and Inform*. Muska & Lipman/Premier-Trade, 2005.
[6] D. Rodríguez-Andrés, M. C. Juan, R. Mollá, and M. Méndez-López, "A 3d serious game for dental learning in higher education," in *17th International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT)*, 2017, pp. 111–115.
[7] M. Callaghan, M. Savin-Baden, N. McShane, and A. G. Eguíluz, "Mapping learning and game mechanics for serious games analysis in engineering education," *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, vol. 5, no. 1, pp. 77–83, 2017.
[8] M. Furuichi, M. Aibara, and K. Yanagisawa, "Design and implementation of serious games for training and education," in *UKACC International Conference on Control (CONTROL)*, 2014, pp. 691–695.
[9] T. Jordine, Y. Liang, and E. Ihler, "A mobile-device based serious gaming approach for teaching and learning java programming," in *IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, 2014, pp. 1–5.
[10] J. C. K. H. Riedel and J. B. Hauge, "State of the art of serious games for business and industry," in *17th International Conference on Concurrent Enterprising*, 2011, pp. 1–8.
[11] A. J. Q. Tan, C. C. S. Lau, and S. Y. Liaw, "Serious games in nursing education: An integrative review," in *9th International Conference on Virtual Worlds and Games for Serious Applications*, 2017, pp. 187–188.
[12] Accessible University, "Defining Accessibility," 2016. [Online]. Available: https://goo.gl/Hwr2vC
[13] Kotaku, "Deaf Gamer Founds A Fighting Games Team For Players Like Him," 2017. [Online]. Available: https://goo.gl/y5cWMQ
[14] ——, "Blind Player Racks Up A Win At His First Street Fighter V Tournament." [Online]. Available: http://compete.kotaku.com/blind-player-racks-up-a-win-at-his-first-street-fighter-1793936241

[15] Eurogamer, "Meet the blind gamer with a Killer Instinct • Eurogamer.net." [Online]. Available: http://www.eurogamer.net/articles/2016-03-29-meet-the-blind-gamer-with-a-killer-instinct
[16] World Health Organization, "Grades of hearing impairment," 2016. [Online]. Available: https://goo.gl/1pWAZd
[17] ——, "International Classification of Diseases (ICD)," 2011.
[18] Colour Blind Awareness, "What is Colour Blindness? — Colour Blind Awareness." [Online]. Available: http://www.colourblindawareness.org/colour-blindness/
[19] A. M. Hussaan, K. Sehaba, and A. Mille, "Tailoring serious games with adaptive pedagogical scenarios: A serious game for persons with cognitive disabilities," in *2011 IEEE 11th International Conference on Advanced Learning Technologies*, July 2011, pp. 486–490.
[20] C. S. Lanyi, D. J. Brown, P. Standen, J. Lewis, V. Butkute, and D. Drozdik, "Goet european project of serious games for students with intellectual disability," in *2011 2nd International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)*, July 2011, pp. 1–6.
[21] G. A. E. Khayat, T. F. Mabrouk, and A. S. Elmaghraby, "Intelligent serious games system for children with learning disabilities," in *2012 17th International Conference on Computer Games (CGAMES)*, July 2012, pp. 30–34.
[22] M. Saridaki and C. Mourlas, "Incorporating serious games in the classroom of students with intellectual disabilities and the role of the educator," in *2011 Third International Conference on Games and Virtual Worlds for Serious Applications*, May 2011, pp. 180–181.
[23] M. Callaghan, M. Savin-Baden, N. McShane, and A. G. Eguíluz, "Mapping learning and game mechanics for serious games analysis in engineering education," *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, vol. 5, no. 1, pp. 77–83, Jan 2017.
[24] D. Pranantha, F. Bellotti, R. Berta, and A. D. Gloria, "A format of serious games for higher technology education topics: A case study in a digital electronic system course," in *2012 IEEE 12th International Conference on Advanced Learning Technologies*, July 2012, pp. 13–17.
[25] M. I. Torres-Carazo, M. J. Rodríguez-Fórtiz, and M. V. Hurtado, "Analysis and review of apps and serious games on mobile devices intended for people with visual impairment," in *International Conference on Serious Games and Applications for Health*, 2016, pp. 1–8.
[26] Z. S. de Urturi, A. M. Zorrilla, and B. G. Zapirain, "Serious game based on first aid education for individuals with autism spectrum disorder (asd) using android mobile devices," in *16th International Conference on Computer Games*, 2011, pp. 223–227.
[27] A. Jaramillo-Alcázar, L. Salvador-Ullauri, and S. Luján-Mora, "A Mobile Serious Games Assessment Tool for People with Motor Impairments," in *9th International Conference on Education Technology and Computers*, January 2017, pp. 172–177.
[28] ——, "Accessibility Assessment of Mobile Serious Games for People with Cognitive Impairments," in *2nd International Conference on Information Systems and Computer Science*, November 2017, pp. 323–328.
[29] A. Jaramillo-Alcázar and S. Luján-Mora, "An Approach to Mobile Serious Games Accessibility Assessment for People with Hearing Impairments," in *International Conference on Information Technology and Systems*, January 2018, pp. 552–562.
[30] ——, "Mobile Serious Games: An Accessibility Assessment for People with Visual Impairments," in *5th International Conference Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality*, October 2017, pp. 66:1–66:6.
[31] Kotaku, "People Are Falling In Love With A Video Game Mouse Who Uses Sign Language," 2017. [Online]. Available: https://kotaku.com/people-are-falling-in-love-with-a-video-game-mouse-who-1797534518
[32] K. Scott, *The Unified Process Explained*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2002.
[33] M. Fowler, *UML Distilled (Third Edition): A Brief Guide to the Standard Object Modeling Language*. Addison-Wesley, 2003.
[34] United Nations General Assembly, "Convention on the rights of persons with disabilities," 2017. [Online]. Available: https://goo.gl/ZuFucZ

MasterEngineer: A Game-based technique in Power Electronics and Drives Teaching

M.J. Duran, I. Gonzalez, P. Garcia-Entrambasaguas, J.J. Aciego, A. Gonzalez, N. Rios
Department of Electrical Engineering
University of Malaga (Spain)
email: mjduran@uma.es

Abstract- Power electronics and drives have increased their presence at industry both in renewable energies, power systems and electric traction. For this reason, future electrical engineers need to acquire advanced competences in this field. Although chalk-and-board and slides can be used at degree and master level, the inclusion of game-based activities improve the motivation and life-long learning of students. This paper presents a newly design game to deeply understand the different arrangements and performance of power converter and electric machines. The game-based approach favors the acquisition of cross competences and promotes technical discussion and exposition abilities.

Index Terms- ***Power electronics, drives, education, game-based.***

I. Introduction

The role of electric engineers at industry has evolved in the last decades with the ever increasing penetration of power electronics both in power systems and electrical drives [1]. The transition from fossil fuels to renewable energies, the evolution from internal combustion engines to electric vehicles and the change of paradigm from concentrated power systems to micro- and smart-grids is fully modifying the manner to generate and consume energy. New electric engineers need new competences in order to be useful in this renewed scenario.

Aiming to adapt to the new requirements, the curriculum has been renewed at degree and master level, including new subjects that deal with wind energy systems, electric vehicles and smart grids, to name a few [2]. Nevertheless, the teaching methodology has been maintained in most cases as it was in the past: chalk-and-board lectures with the help of slides following a teacher-centred approach [3-4]. Different attempts have been made to include new technologies in the form of simulation activities or lab teaching [5-6], but in most cases the interaction of students with the teacher or other students is kept low. Although, there is no doubt that standard lectures are extremely useful and efficient to *deliver knowledge*, especially in groups with a high number of students, it maintains the student in a passive role and this limits the creative thinking and the training of cross competences (e.g. team work) [7].

With the objective to increase the motivation and promote creative thinking and team work abilities, gamification based techniques in different versions can be useful tools [8]. The idea is not to replace traditional methodologies, but to complement them in specific sessions. The use of game-based approaches brings special benefits when the lecture sessions are prolonged beyond two hours, since they can break the monotony and bring the attention back to the content of the course (this is the case of the present experience).

This work presents the proposal of a game specifically designed to train students in the use of power electronics and electrical machines. It is used in a wind energy course at the University of Malaga, but the same game-based technique can be used in any subject dealing with high-power systems or in any course on electric drives or power electronics. The proposed game divides the class in two halves and males both team compete using rules that are inspired in the popular television program *MasterChef*. In this case the structure of the game is adapted to the creation of topologies for high-power energy conversion systems, and it is thus entitled *MasterEngineer*.

The details of the context and the course where this experience was tested are described in section II, whereas the game itself is detailed in section III. Some comments on the educational impact of the tool are discussed in section IV and the main conclusions from the implementation of this game-based techniques are summarized in section V.

II. Academic Context and Motivation

The University of Malaga offers specialization courses for all kind of students and professionals [9]. Among them, the electrical engineering department lectures a course on wind energy conversion systems (WECS) from the point of view of the power conversion, placing the focus on the different types of electric generators and power converters used in the wind industry [10]. Since these courses need to be attended after the degree lectures or working days, they are typically placed on Friday evenings and Saturday mornings in 5-hours long lectures. According to the standard pedagogic guidelines and common sense, it becomes apparent that lecturing for five hours is not an ideal scenario to capture the students' attention. Nevertheless, in this case it is mandatory to concentrate the teaching in rather long sessions because it is not reasonable to prolong the course in excess (2-hour sessions would extend the course for 8 weeks in a 30-hour course). In order not to discourage students, the teaching approach needs to be as dynamic and interactive as possible.

The course on wind energy systems lasted for 20 hours that were split in 4 sessions with the following content:

- Session 1: Introduction to wind energy systems. The current status of WECS is described and some generalities are explained.

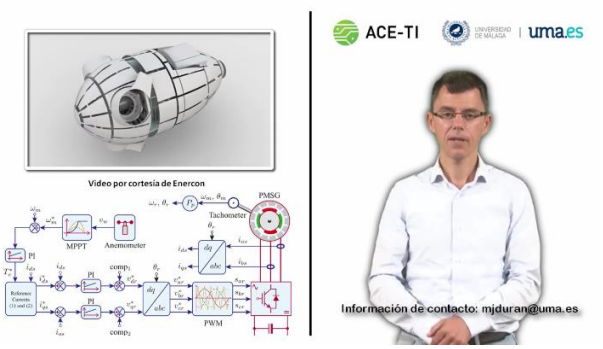
- Sessions 2: Technical aspects of WECS. The different parts of the energy conversion system inside the nacelle are described and some basic background about electric generators and power electronics is included.
- Sessions 3: Topologies in WECS. The arrangement of machines and converters is explained in this session for partial and full-power WECS.
- Session 4: Industry cases and future. Industrial products with the corresponding datasheet are reviewed and some comments on the foreseeable trends are given. Lab-scale and low-power WECS inside the school are visited.

In this context, the teaching methodology has been adapted to break the monotony of the speech. The dynamic methodology was achieved in the past by using numerous videos and intermediate tests during the course. This work reasonably well for the first two sessions (more descriptive) and for the fourth session (including a visit to the wind mill of the School and the WECS demonstrator at lab scale). Fig. 1 shows photos of the videos, the lab-scale WECS and the wind mills of the School at UMA which are visited in session 4. However, the third session was quite technical and arid and the teachers involved in the course realized that part of the class lost attention during this session in spite of its technical interest. For this reason, the organizers of the course decide to include a methodological change in the edition of 2017.

The new experience for session 4 had some requirements:

- It had to be as dynamic as possible.
- Opposite to the use of videos and visits, it should be interactive.
- It should help the students understand the content of the session, i.e., the possibilities to arrange converters and machines to get the desired performance from the energy conversion system.
- It should be entertaining. It is an extension course placed on Friday evening, typically after morning classes or working day at a company. Hence, getting some fun out of the lecture is advantageous from the didactic point of view.

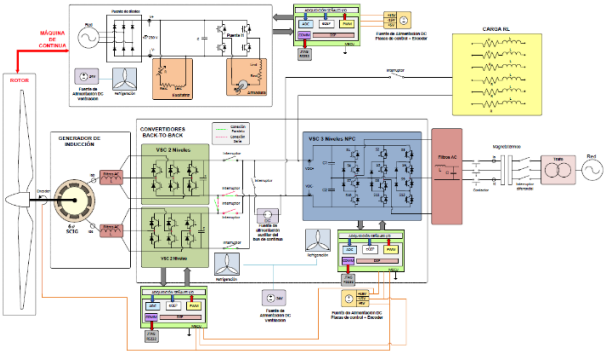
With these characteristics in mind, the organizers of the course decided to build some thick cardboards that included the different elements that can be used in the creation of an energy conversion systems (converters, machines, etc.), so that students could have physically the elements on the table and try to build their own topologies. However, providing the cardboards might be helpful to excite creativity, but did not promote interaction. At this stage it seemed a good didactic approach the inclusion of a game together with the cardboards to increase the level of fun and technical discussion. Since cardboards and topologies could be seen as ingredients and recipes, respectively, the analogy with cooking was simple and effective.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 1. Elements used in the past to include dynamism in the lecture hours: (a) Videos, (b) lab-scale WECS, (c) Scheme of the lab-scale WECS and (d) wind mills on the roof of the School of Engineering at UMA.

This fact led to the design of the *MasterEngineer* game as a parody of the popular cooking competitions shown in television programs. The elements and structure of the game is detailed next.

III. *MASTERENGINEER*: THE GAME STRUCTURE.

MasterChef is a competitive cooking show television originated in UK in 1990 and later on exported to more than 40 countries and aired in more than 200 territories. In this program, amateur chefs design recipes and cook dishes under certain specifications and rules.

Due to the popularity of the competition and the possibility to use an analogy between cooking and designing a certain topology for WECS, this game structure was taken as a basis, and experience was termed *MasterEngineer* and tested in specialization courses at the University of Malaga (see section II). Most students presumably knew the game, and this could increase the motivation and allow the teachers to include some humoristic hints during the sessions by making a parody of the *MasterChef* format.

In this case, the students are challenged to design a certain topology (recipe) for wind energy conversion systems (WECS) using available devices (ingredients). This approach aims to promote the creative thinking, interactivity and motivation. The elements used for the game, some examples of the topologies that can be built and the game structure are described next.

A. Elements of the game.

The elements of the game or *ingredients* are thick cardboards that include different elements typically used in energy conversion systems (see Fig. 2). These elements included different electric generators (induction, doubly-fed, permanent magnet, multiphase, to name a few), converters (two-level and three-level voltage source converters, boost converters, diode rectifiers, to name a few), grid-connection systems (onshore, offshore, DC, AC, etc.) and other elements (blades, gearbox). A minimum of 4 and a maximum of 10 thick cardboards for each element were created for the purpose of the game. Fig. 2 show some examples of selected elements for illustrative purposes. It must be highlighted that during the game (see section III.C) each element was associated with some technical data (power rating, nominal voltage, etc). Cardboards are however kept empty and it is the responsibility of the teacher to associate the technical data with each element before he/she challenges the student.

All the elements were created based on the organizers' knowledge of the current state of the art in WECS. In other words, the different solutions adopted for the top ten wind turbine manufacturers were examined and their elements were replicated in the cardboards. In this way, it was possible to create the topologies of WECS from Vestas, Gamesa-Siemens, and the rest of major world manufacturers. Some further information about the possible topologies that can be obtained from the proper arrangement of the elements in Fig. 2 is described next.

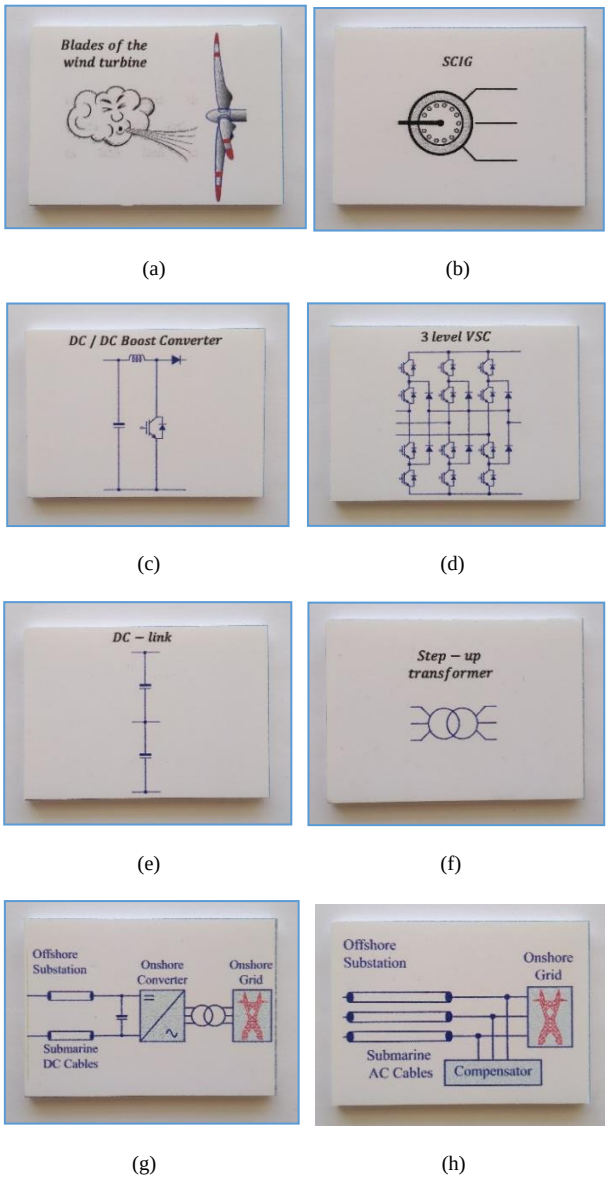


Fig. 2. Some selected examples of thick cardboards used as elements for the proposed game: (a) Blades of the wind turbine, (b) squirrel-cage induction generator, (c) Boost DC/DC converter, (d) three-level voltage source converter, (e) DC-link, (f) step-up transformer, (g) offshore DC transmission system and (h) offshore AC transmission system.

B. Topologies

One of the interesting things about the current state of the art of WECS is that a standard solution has not been reached yet [10]. As a matter of fact, different manufacturers are using very different solutions to convert the wind energy extracted by the blades in electric energy delivered to the network. This wide variety includes different:

- voltage ratings (low/medium)
- number of converter levels (two/three level)
- generator speeds (low, medium and high)
- options for the gearbox (geared/direct-drive)
- number of generator phases (3-phase/multiphase)

- amount of regulated power (partial/full-power)
- type of cables (standard/superconductors)
- type of location (on/off shore)
- type of transmission (AC or DC)
- type of rectifier (passive/active diode/IGBT)
- Power direction (uni/bidirectional)

This heterogeneity leads to significant number of different topologies in WECS already implemented at industry and even more of we consider other topologies that are proposed in the research stage. Apart from different strategies of manufacturers, it is worth highlighting that the increasing level of requirements from network operator worldwide (e.g. capability to handle voltage sags and provide reactive/active power for voltage/frequency control) is constantly modifying the scenario. Hence, solutions for WECS need to be adapted, this resulting in new topologies that better suit the new and demanding requirements.

Since the elements built in the cardboards (Fig. 2) reflect all the necessary elements to replicate industry products, it is possible to create multiple topologies. As an example, Figs. 3a and 3b show the case of a full-power topology at low-voltage with permanent magnet synchronous generator (PMSG) and two-level converters. The conceptual scheme is depicted in Fig. 3a whereas the topology created with the cardboards is shown in Fig. 3b. Similarly, Figs. 3c and 3d show the case of a multiphase generator with two back-to-back (B2B) power modules and a multiphase step-up transformer. The latter case replicates the latter 5MW WECS from manufacturer Gamesa-Siemens (with 12-phase generator and 4 B2B modules). Cases shown in Fig. 3 are just two examples of a wide variety of possibilities that can be obtained with the elements from Fig. 2.

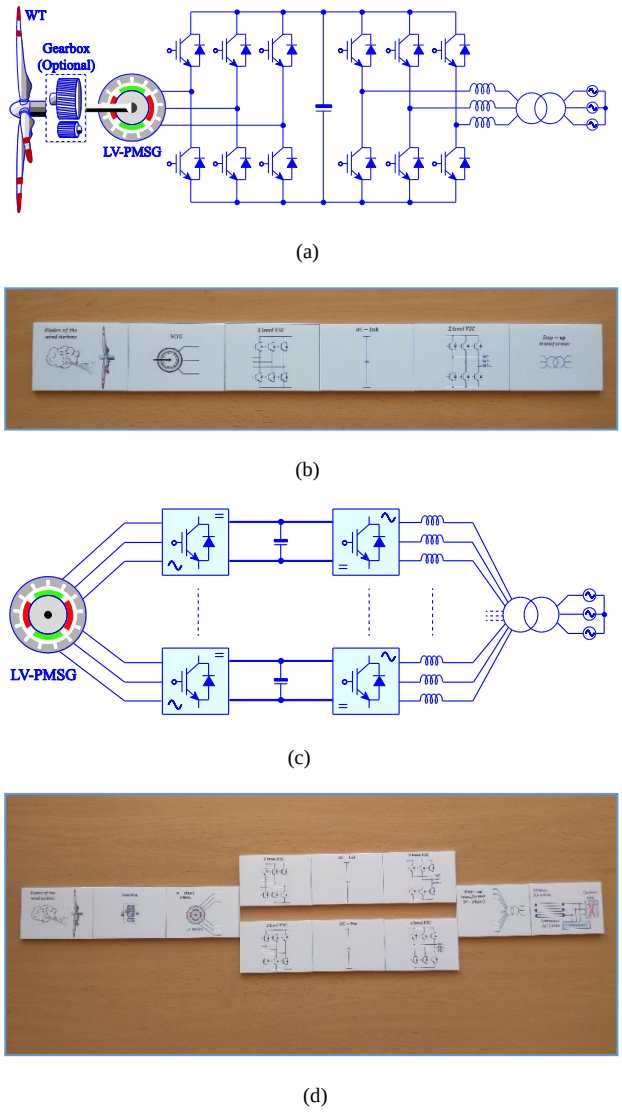


Fig. 3. Example of a full-power topology based in PMSG and two-level VSCS: (a) scheme and (b) topology created with the cardboards.

C. Game structure.

A schematic of the game structure is shown in Fig. 4, detailing the different stages that are followed in a sequential manner. First of all, the teachers explain the structure of the game and divide the class in two groups that are subsequently named as red team and blue team (preserving the colours of the original *MasterChef* competition).

Then, the first stage is the challenge. The teachers provide some clear specifications for the WECS that needs to be designed (power rating, voltage level, price, reliability, etc.) and the students are challenged to find the topology that better suits the specified requirements. Most of the requirements are selected by the teachers on the basis of commercially available WECS. After the challenge is posed, time is given to both teams in order to think about the possible arrangements. This thinking time must be a period of discussion among students and the teacher role is just to observe and, if necessary, encourage the technical discussion. After this period of time, the students must go to the *supermarket* and select the most suitable *ingredients* (elements from Fig. 2) for the topology they have in mind

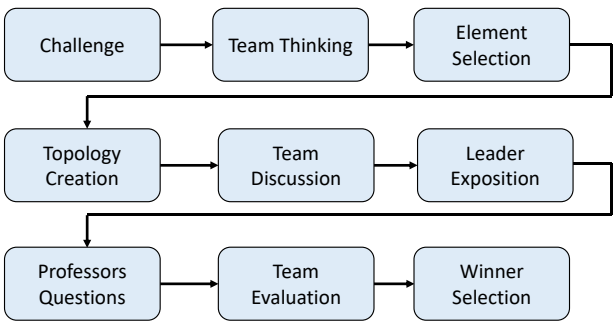


Fig. 4. Scheme of the *MasterEngineer* game structure.

after the discussion of the previous stage. At this point there are some variations of the game, according to how many elements are allowed to take. The number must exceed the number of cardboards that are necessary and the teacher can discard one element (optional). Once they have the

elements, it is time for each group to create the topology and prepare the exposition (see Fig. 5). The group has to firstly select the leader/spokesperson, who will be in charge of the exposition, and then carefully prepare all the arguments for the defence. This task is done in parallel by both groups, red and blue.

After this period, the representative of both groups sequentially have to expose the selected topology and justify why their choice matches the requirements of the challenge. The teachers firstly listen to the exposition and then ask questions with the aim to verify if the arguments are solid or not. The time for questions can be done in tough but rather informal mode, resembling the mechanism used in the original *MasterChef* game (typically with one teacher acting as the *bad guy*). The evaluation of each team will not only be based on the right selection of the topology, but also on the manner they have defended their choice. In some cases, the topology can be right but the defence is poor and vice versa. After both teams have been scored, a winner of the challenge is awarded and gets one point for the final score.

The same structure from Fig. 4 is repeated for each challenge (in the 2017 edition the game had 4 different challenges), rotating the team representative so that the maximum number of students do an exposition and have to defend their technical arguments against the teachers. At the end of all challenges one of the teams is the final winner and the game ends. A symbolic award can be given to the winner team and to the best member of both groups. It is important to keep a relaxed atmosphere during the game so that students feel free to think, discuss among them and get joy from the learning process. If correctly done, the methodology can provide some competences which are not fully excited with the traditional teaching. Some further details on this benefits are commented next.

IV. Educational impact.

Traditional lectures based on chalk-and-board and slides within a teacher-centered methodology are very useful to inform the students about the current status of wind energy systems. However, many competences which are highly demanded by industry are not properly excited. The use of game-based techniques can promote certain cognitive dimensions and competences and complement in this manner the traditional methodology. Table I summarizes the degree of achievement with lectures and the proposed *MasterEngineer* game in different dimensions.

Lectures provide a very good performance in technical aspects related to the content and problem solving involving maths (e.g. traditional problems and examples). However, the interaction, speech abilities and team work competences kept low. The game proposal based on the described *MasterEngineer* game formerly brings some additional benefits in the student training:

- Interaction: the team thinking and team discussion stages promote the student-student interaction. This is mostly avoided in standard lectures and brings an interesting cross compentence.



Fig. 5. Students involved in the Team Discussion stage after the topology has been designed and created with the selected cardboards.

Table I: List of competences and a qualitative evaluation of the degree of excitement with standard lectures and with the proposed *MasterEngineer* game.

Dimensions	Lectures	*MasterEngineer*
Technical content (concepts)	↑↑	↑↑
Technical calculations (math)	↑↑	—
Technical discussion	↑	↑↑
Motivation	↑	↑↑
Student-student interaction	↓↓	↑↑
Student-Teacher interaction	↑	↑↑
Application oriented	↑	↑↑
Speech abilities	↓	↑
Creative thinking	↑	↑↑
Problem solving competences	↑↑	↑↑
Team work competences	↓↓	↑↑

- Motivation: although standard lectures can be motivating if properly designed, it is difficult to compete with the degree of motivation that is obtained with game-based techniques. The *MasterEngineer* game proved to capture the attention of the students who were highly involved in the aim of winning the game (regardless of the age or previous training). In a sense all participants of the course behaved like children playing to win the game and beat the other team.
- Creative thinking: while problems in standard courses are closed in many cases, the challenges of the proposed game are quite open and this forces students to be creative and use the main concepts to fulfill the requirements.
- Technical discussion: the game brings helps the student to train how to behave in a technical discussion, make an exposition with correct terms, etc.

Since the proposal has only been tested in 2017 and inside a course with low number of students (15-20), there are no statistical data to quantify the success of the experience, but the subjective perception of the game implementation is highly satisfactory. Students got extremely involved on the game process and the informal interviews after the course provided a highly positive feedback about the methodological change.

V. CONCLUSIONS

Standard lectures have some deficiencies related to the interaction among students, motivation and capability to promote creative thinking. Furthermore, in courses lasting more than two hours the teacher-centered approaches are not the best choice since they typically lead to low attention from the students' side. Aiming to enhance the dynamism of the 5-hours sessions in a WECS course at the University of Malaga, a game-based technique termed *MasterEngineer* has been implemented in 2017 and presented in this work. The game-based approach and the structure of the game promotes the technical discussion both among students and with the teacher. The open-type challenge promotes creative thinking and the competition typically brings some additional motivation. With no aim to fully replace the traditional methodology, the current proposal becomes a tool to complements standard lectures and fill the gap related to some cross competences which are mostly neglected in previous methodologies within the same course.

REFERENCES

[1] M.J. Duran, F. Barrero, A. Pozo-Ruz, F. Guzman, J. Fernandez and H. Guzman, "Understanding power electronics and electrical machines in multidisciplinary wind energy conversion system courses," *IEEE Transactions on Education*, vol. 56, no. 2, pp. 174-182, 2013.

[2] S.L. Toral, M.R. Martinez-Torres, F. Barrero, S. Gallardo and M.J. Duran, "An electronic engineering curriculum design based on concept-mapping techniques," *International Journal of Technology and Design Education*, vol. 17, no. 3, pp. 341-356, 2007.

[3] G. Verbic, C. Keerthisinghe and A.C. Chapman "A Project-Based Cooperative Approach to Teaching Sustainable Energy System," *IEEE Transactions on Education*, vol. 60, no. 3, 2017.

[4] M. J. Duran, F. Barrero, I. Gonzalez-Prieto, H. Guzman, A. Pozo; M. Bermudez and C. Martin, "A scientific approach in wind energy courses for electrical engineers," 2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE) Seville, *Spain*, 2016, pp. 1-6.

[5] M.J. Duran, S. Gallardo, S.L. Toral, R. Martinez-Torres and F.J. Barrero, "A learning methodology using Matlab/Simulink for undergraduate electrical engineering courses attending to learner satisfaction outcomes," *International Journal of Technology and Design Education*, vol. 17, no. 1, pp. 55-73, 2007.

[6] S. Gallardo, F. Barrero, S.L. Toral and M.J. Duran, "eDSPlab: A remote-accessed instrumentation laboratory for digital signal processors training based on the Internet," 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics (IECON 2006) Paris, *France*, 2006, pp. 4656-4661.

[7] S.L. Toral, F. Barrero, M.R. Martinez-Torres, S. Gallardo and M.J. Duran, "Modeling learner satisfaction in an electronic instrumentation and measurement course using structural equation models," *IEEE Transactions on Education*, vol. 52, no. 1, pp. 190-199, 2009.

[8] A. Triviño, M.J. Duran, S. Pineda, S. Torre and J. Aguado "TESLA: A Gamification framework to motivate students in Industrial Engineering," 1st International Workshop on Gamification and Games for Learning, 2017.

[9] Specialization courses at the University of Malaga, https://www.uma.es/titulacionespropias/ Online available.

[10] V. Yaramasu, A. Dekka, M.J. Duran, S. Kouro and B. Wu, "PMSG-based wind energy conversion systems: survey on power converters and controls," *IET Electric Power Applications*, vol. 11, no. 6, pp. 956-968, 2017.

Discovering *EnjoyCircuits:* the Mobile App for Fundamentals of Electric Engineering

M.J. Duran, A. Fernandez, I. Gonzalez, A. Gonzalez
Department of Electrical Engineering
University of Malaga (Spain)
email: mjduran@uma.es

A. Duran
Department of Communication Eng.
University of Málaga (Spain)

L. Parras
Department of Fluid Mechanics
University of Málaga (Spain)

***Abstract*- Mobile applications have experimented a huge evolution in the last years. These applications are already an important tool in our daily life. From the point of view of the penetration of this mobile technology in the different scales of the society, university students are one of the main users of this mobile technology. For this reason, this work proposes a learning mobile application entitled *EnjoyCircuits* for Fundamentals of Electric Engineering of the Industrial Technology Engineering Bachelor. This mobile application is a learning tool based on the resolution of quick problems of circuit theory. With *EnjoyCircuits* students can do a dynamic review of the Fundamentals of Electric Engineering anywhere and anytime. Moreover, they can compete with other users in the *EnjoyCircuits* ranking.**

Index Terms- *Mobile application; Bachelor of Industrial Technology Engineering; Fundamentals of Electric Engineering.*

I. INTRODUCTION

The world experiences a continuous evolution due to the advances in technology. From the point of view of the academic community, it is worth exploring the new opportunities provided by new technologies. These advances have allowed the use of novel communication channels to expand the knowledge around the world. In summary, this new academic era matches perfectly with the concept of anywhere and anytime.

This current technology situation has particularly promoted the development of learning tools based on the distance learning concept (d-learning). The d-learning concept can be defined as a way of remote learning without a regular face-to-face contact with a teacher in the classroom. In this regard, different platforms of d-learning have been proposed during the last decade [1-4]. Although there are different d-learning variants, all of them must satisfy the universal instructional design principles for d-learning tools [5-6]. These universal principles can be summarized in the following points:

P1) equitable use
P2) flexible use
P3) simple and intuitive use
P4) perceptible information
P5) tolerance for error
P6) low physical and technical effort
P7) community of learners and support
P8) instructional climate

Even though different d-learning platforms based on the previous universal principles have been developed, the real turning point in the d-learning history appears with the arrival of the handheld computers and smartphones, due to their relative low cost and their great integration in the worldwide population. The d-learning methods based on the mobile technology are defined as mobile learning (m-learning) [5]. This version of d-learning is relatively novel, however different alternative of m-learning tools have been explored [5-]. In this regard, mobile applications are an interesting alternative due to their high integration in our daily life. In fact, nowadays there is a large number of mobile applications based on language learning language [7] or basic scholar concepts (mathematics, geography …) [8]. However, there is still an emptiness in the development of mobile applications for university subjects. This fact surprising when the college students are precisely one of the main consumers of mobile applications [9]. For this reason, this work proposes an m-learning application entitled *EnjoyCircuits* for Fundamentals of Electric Engineering in the Bachelor of Industrial Technology Engineering at the University of Malaga (Spain). This m-learning application has been developed by researchers of the ACETI research group. Although this research group already has some experience in educational publication based on electric engineering [10-15], this work is presented as a new teaching research line for ACETI.

Obviously, the objective of this m-learning application is not to replace the master classes of Fundamentals of Electric Engineering. *EnjoyCircuits* must be employed only like a support of these master classes. The proposed learning mobile application is based on the resolution of quick problems related with the main modules of Fundamentals of Electric Engineering. These modules are available in *EnjoyCircuits* with the following titles:

M1) basic concepts
M2) knots and meshes methods
M3) basic theorems
M4) ac-current problems
M5) three-phase problems.

This initial version of *EnjoyCircuits* includes a set of 116 problems. The users of this m-leaning application can find in this set of problems: multi-option problems, numeric problems and matrix problems. Although the nature of these problems is different, all of them are close problem that can be quick solved. In order to increase the motivation of the students in the use of *EnjoyCircuits*, a ranking based on the final score of users is implemented. For this purpose, a score system has been developed. In the proposed system, the final score is function of the resolution time, since

EnjoyCircuits is an m-learning tool based in the resolution of quick problems.

The paper is organized as follows. Section II describes the academic context of *EnjoyCircuits*. The development of this m-learning application and the software employed in the building process are detailed in the section III. Section IV discovers the main modules of the proposed learning mobile application and conclusions are finally summarized in the last section.

II. ACADEMIC CONTEXT

As noted above, *EnjoyCircuits* is an m-learning tool for the students of Fundamentals of Electric Engineering. This subject is lectured in the second course of the Bachelor of Industrial Technology Engineering from the University of Malaga (Spain). Fundaments of Electric Engineering has been historically known as Theory of Circuit and it is a basic subject in the majority of engineering bachelor. The academic information of Fundamentals of Electric Engineering is included in the *Verifica* Memory of the Bachelor of Industrial Technology Engineering [16]. Following the above mentioned memory, the Fundamentals of Electric Engineering syllabus can be shifted in five modules where the modules 1, 2 and 3 have an important teaching load (see Table I for more details).

Although the table 1 shows that the modules of *EnjoyCircuits* exactly match with the syllabus of Fundamentals of Electric Engineering of the Bachelor of Industrial Technology Engineering, the use of *EnjoyCircuits* is not only restricted to students of this bachelor degree since Fundamentals of Electric Engineering is a common subject in different engineering bachelors. For example in the University of Malaga the syllabus of this subject is common in the following bachelor degrees: Industrial Technology Engineering, Electric Engineering, Electronic Engineering, Mechanic Engineering, Energy Engineering, Industrial Design Engineering and Mechatronic Engineering. Therefore, due to the basic nature of the proposed subject, *EnjoyCircuits* can be a useful learning tool for a large number of students at the University of Malaga.

III. MOBILE APPLICATION DEVELOPMENT

The developed application is based on the Android technology. This mobile operative system (MOS) was selected due to its popularity in the development of mobile applications. However, other mobile operative systems could be used without technical restrictions.

On the other hand, although Android Studio is the main employed software in the building process, several software tools have been used in the development of *EnjoyCircuits*. This section introduces these software tools and describes their main features. Fig. 1 shows a scheme of the main building process of *EnjoyCircuits* and the different software tools employed in the development of these building process.

TABLE I

FUNDAMENTALS OF ELECTRIC ENGINEERING SYLLABUS

B1. Fundamental elements and circuit analysis (22.5h) - Basic concepts - Basic theorems - Knots and meshes methods
B2. Analysis of ac-current circuits (18h)
B3.Three-phase circuits (13.5h)
B4.Transient process (4.5h)
B5. Electric machines (1.5h)

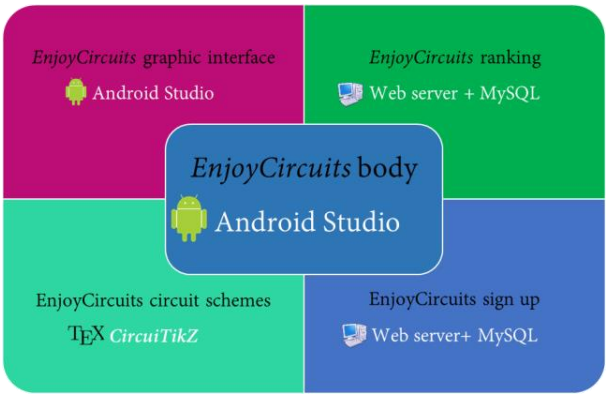


Fig. 1. *EnjoyCircuits* scheme and employed software.

A. Android Studio

EnjoyCircuits was designed using the software Android Studio. This software is the official integrated development environment (IDE) of Android. It was announced in 2013 and replaced Eclipsed as official IDE of Android. This IDE is written in Java and it is available for Windows, Linux and Mac OS. Android Studio supports all the languages of IntelliJ IDEA (one of the first available Java IDEs). Two building options are available in Android Studio. The first of these building modes is based on the employed of Java language (see Fig. 2). The application body was bought using this Android Studio mode while the *EnjoyCircuits* graphic design was realized with the second building mode. This other mode is a graphic interface which allows the development of the graphic design of the mobile applications (see a screenshot of this mode of Android Studio in Fig. 3).

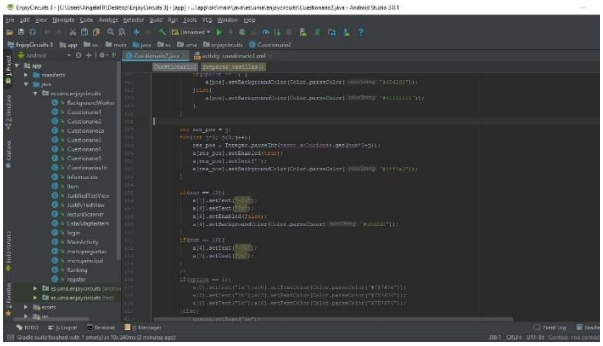


Fig. 2. Screenshot of the Java mode of Android Studio

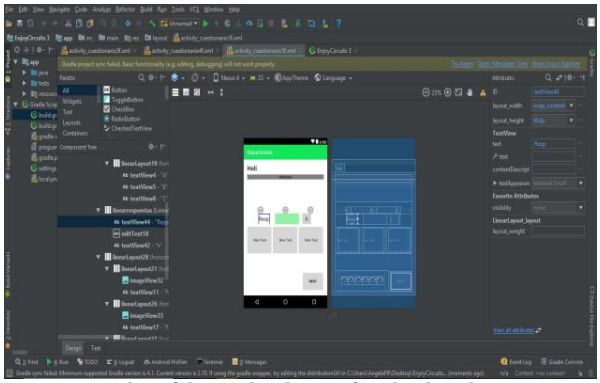


Fig. 3. Screenshot of the graphic design of Android Studio

B. CircuiTikZ

EnjoyCircuits presents a huge number of problems with electric circuit schemes. For this reason, it is necessary to select a suitable tool for the electric circuit design. There are two requirements in this design process: *i)* a suitable quality of the figures and *ii)* a low computational weight of the figures. Attending to these two requirements the *CircuiTikZ* tool was selected to design the electric circuit schemes of *EnjoyCircuits. CircuiTikZ* was initiated by Massimo Redaelli in 2007 and was created as a tool for creating exercises and exams. This design platform is based on the LaTex language. The use of *CircuiTikZ* is, of course, not limited to academic teaching. The package gets widely used by engineers for typesetting electronic circuits for articles and publications all over the world. *CircuiTikZ* provides the necessary electric components to build the different implemented electric schemes of *EnjoyCircuits.* An electric circuit designed using *CircuiTikZ* is represented in Fig. 4.

C. Web server and database

The *EnjoyCircuits* ranking needs a web server to establish the communication between the smartphones and the database where the global ranking of *EnjoyCircuits* is calculated. For this purpose, a virtual machine was employed to define the communication between the *EnjoyCircuits* application and the database of the web server. This database must receive the registration information of the users and the user score in the different exercises. On the other hand, the web server must deliver to the *EnjoyCircuits* application the position and the final score of the users in the *EnjoyCircuits* ranking. The management of the database is realized with MySQL. This software is employed in the management of database and is the open source database most popular in the world.

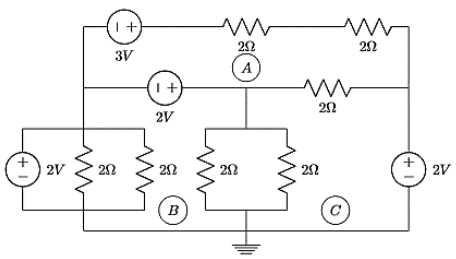


Fig. 4. Electric circuit scheme created using *CircuiTikZ.*

IV. Discovering EnjoyCircuits

This section allows discovering the proposed mobile application. A tour by the different sections of *EnjoyCircuits* is realized. In this tour a brief description of the different screens of *EnjoyCircuits* is also provided.

A. EnjoyCircuits initial screen

The initial screen of *EnjoyCircuits* presents two access options for the users. The new users can access the registration process if the *Sign Up* option is selected. On the other hand, the previously registered users can access to their personal accounts with the *Log In* option. Fig. 5 shows the *EnjoyCircuits* initial screen with the two previously mentioned access options.

B. EnjoyCircuits sign up screen

In Fig. 6 the registration screen of *EnjoyCircuits* is depicted. As it is usual, the users must provide some personal data on this type of screen. The personal information is necessary to realize the sign up process in *EnjoyCircuits* in the following: name, surname, nick, university, email, national document of identification (DNI) and password. This sign up process is necessary to realize the suitable tracking of the student evolution in the mobile application. For this reason, *EnjoyCircuits* is programmed to avoid the duplication of users. Hence, two users cannot share *nick* or *email*, this fact also allows preventing problems in the access or in the calculation of the *EnjoyCircuits* ranking. Moreover, in order to realize a suitable tracking of the Fundamentals of Electric Engineering students, the national documents of identification are also verified.

C. EnjoyCircuits Log In screen

On this screen, the users can access their personal account with their previously registered nick and password. In order to reduce the time in the login process, the proposed mobile application allows remembering the required personal information of the *Log In* screen. To do it, the users must select the available *Remember me* tick. A screenshot of the *Log In* screen is represented in the Fig. 7, where the abovementioned option is included.



Fig. 5. *EnjoyCircuits* initial screen.

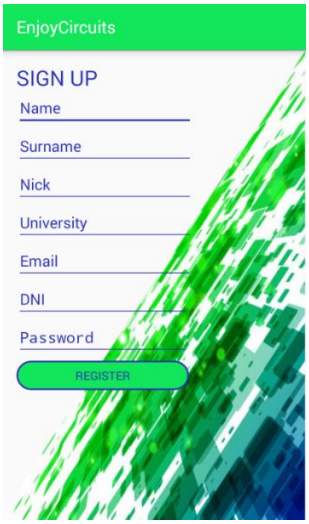


Fig. 6. *EnjoyCircuits Sign up* screen.

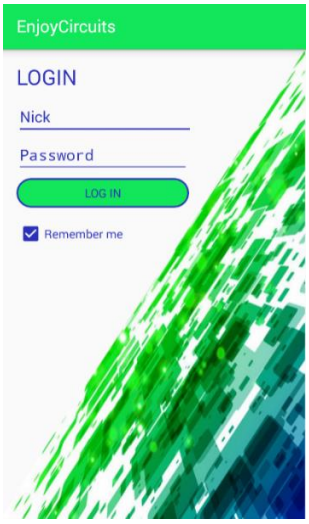


Fig. 7. *EnjoyCircuits Log In* screen.

D. EnjoyCircuits main screen

The *EnjoyCircuits* main screen presents the five problems modules of this learning mobile application. Fig. 8 shows these five blocks of *EnjoyCircuits* where the abovementioned set of 116 quick problems are distributed. Moreover on this main screen, the user can refer the *EnjoyCircuits* ranking or the *EnjoyCircuits* information screen. During the first seconds in this screen, a toast message appears with the total user score.

E. EnjoyCircuits evolution screen

Fig. 9 shows the evolution screen of one module of *EnjoyCircuits*. In the first access to the block, the problems appear marked in a gray tone, indicating that the problem has not yet been solved. *EnjoyCircuits* employs a green tone for problems resolved satisfactorily. On the other hand, if the answer is erroneous, a yellow tone is employed to identify the problem. The proposed scale of colors can be observed in Fig. 10. This fact allows the user to identify in a simple way which problems he/she has failed and need to be reviewed. Moreover, a toast message informs the user about the obtained score in the corresponding block.

F. EnjoyCircuits problems

Android Studio allows defining different type problems. *EnjoyCircuits* exploits this important advantage of Android Studio providing different type problems in this initial version. These problems can be structured in the following three groups:

i) multi-option problems (see Fig. 11)
ii) matrix problems (see Fig. 12)
iii) numeric problems (see Fig. 13)

These problem types are obviously different, but all of them are quick resolution problems. This feature has been considered in the score system of *EnjoyCircuits*, including the resolution time in the final problem score. In other words, the final score is inversely proportional to the time employed in the resolution of the problem. Of course, if the response is erroneous the final score of that problem is zero. Furthermore, that problem will never count for the ranking score, even if the user provides the correct answer in a new attempt (keeping always the previously mentioned yellow color).

On the other hand, the *EnjoyCircuits* problem screen also offers information about the evolution of the user in the corresponding block. The user evolution is indicated through the *EnjoyCircuits* progress bar. This progress bar employs the number of *EnjoyCircuits* logos on the screen to provide a certain information about the evolution in the block (see Fig. 11 for more details).

G. EnjoyCircuits ranking screen

Since the competitive nature of humans is a powerful learning tool, the implementation of competitive activities is a usual practice nowadays in the academic community. For this reason, this learning mobile application presents the *EnjoyCircuits* ranking. With the implementation of this ranking the authors hope to increase the motivation of the students in the use of *EnjoyCircuits*.

As previously mentioned, this ranking is calculated using the database implemented in the web server. In order to safeguard the identity of the users, the *EnjoyCircuits* ranking provides only the user nick and the final score (see Fig. 13).

H. EnjoyCircuits information screen

As usual in these mobile applications, *EnjoyCircuits* presents an information screen. This information screen provides the main objectives of this learning mobile application.

On the other hand, this information screen also gives more details about the *EnjoyCircuits* score systems. In this regards, the influence of the resolution time in the final score is described in details. The proposed score system can be observed in the Fig. 14.

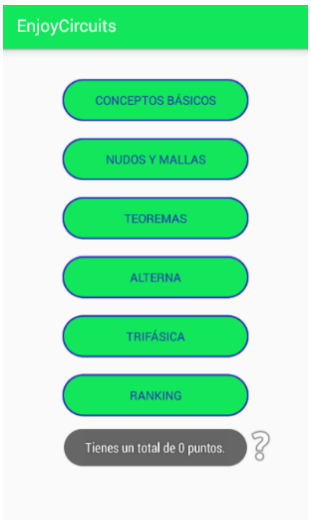


Fig. 8. *EnjoyCircuits* main screen.

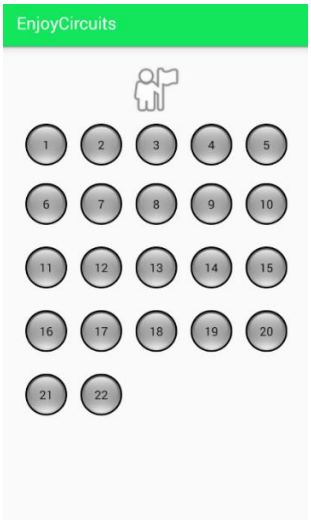


Fig. 9. *EnjoyCircuits* initial evolution screen.

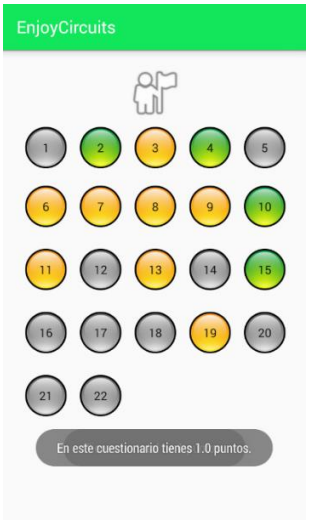


Fig. 10. EnjoyCircuits evolution screen.

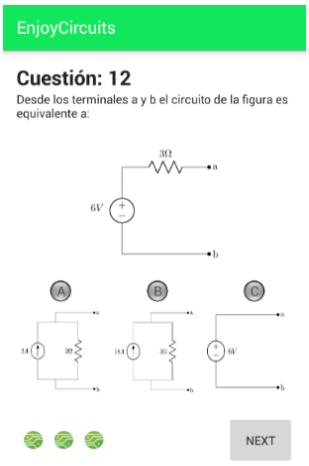


Fig. 10. Example of multi-option problem with tactile response.

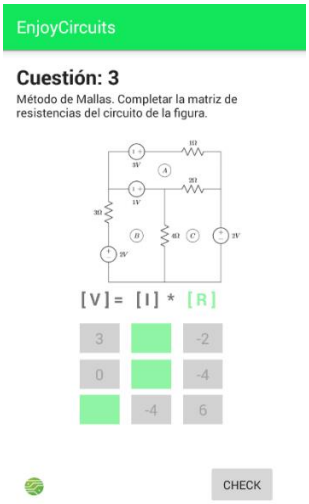


Fig. 11. Example of matrix problem.

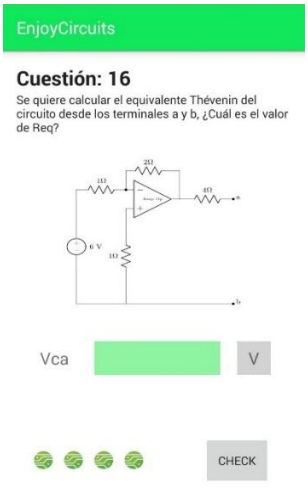


Fig. 12. Example of numeric problem.



Fig. 13. EnjoyCircuits ranking screen.

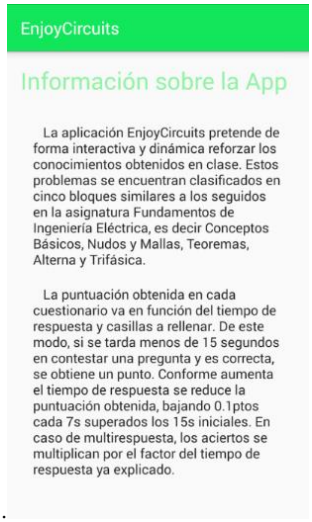


Fig. 14. *EnjoyCircuits* information screen.

V. Conclusions

Attending to the new technology situation in the academic world, this work proposes a learning mobile application entitled *EnjoyCircuits* based on the resolution of quick problems of Fundamentals of Electric Engineering. The users of this mobile application can perform a dynamic review of the basic concepts of Fundamentals of Electric Engineering while they compete with other *EnjoyCircuits* users. Although, this work only introduces the first version of *EnjoyCircuits*, this initial version is already available in the Google Play Store. To validate the goodness of *EnjoyCircuits*, the authors suggest the following validation methodology. Firstly, a satisfaction survey must be realized to the students of Fundamental of Electric Engineering. Moreover, the authors also propose the analysis of the variation in the number of students that pass the Fundamental of Electric Engineering subject. However, several courses of experience are necessary to obtain conclusive results with this validation methodology. Therefore, in this regards this work cannot yet provide information about the goodness of *EnjoyCircuits* if this validation methodology is used.

References

[1] T. A. Baran, R. G. Baraniuk, A. V. Oppenheim, P. Prandoni and M. Vetterli, "MOOC Adventures in Signal Processing: Bringing DSP to the era of massive open online courses," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol.33 , no.4 , pp. 62-83 , 2016.

[2] A. Albiol, A. Corbi and D. Burgos, "Design of a Remote Signal Processing Student Lab," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 16068-16076 ,2017

[3] A. Saliha Sunar, S. White, N. Aniza Abdullah and H. C. Davis, "How Learners' Interactions Sustain Engagement: A MOOC Case Study," *IEEE Transactions on Learning Technologies*, vol.10, no.4, pp. 475-487, 2017.

[4] M. Casini; D. Prattichizzo and A. Vicino, "A student control competition through a remote robotics lab," *IEEE Control Systems*, vol. 25, no.1, pp. 56-59, 2005.

[5] T. Elias, "Universal Instructional Design Principles for Mobile Learning," *International Review of Research in Open and Distance Learning*, vol. 12.2, 2011.

[6] K. Riviou and G. Kouroupetroglou, "Designing an Educational Scenario Using the Principles of Universal Design for Learning," 14th IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies Athens, *Greece*, 2014.

[7] J. LI, S. LI and Y. LI, "English Learning on the Move: A survey and Study of Mobile App Assisted English Learning in Chinese Tertiary Education," The 11th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE 2016) Nagoya, *Japan*, 2016, pp. 767-771.

[8] R.C. Chang and C.Y. Yang, "Developing a Mobile App for Game-based Learning in Middle School Mathematics Course," 2016 International Conference on Applied System Innovation (ICASI) Okinawa, *Japan*, 2016.

[9] J. Gayle, "Smartphone and App Usage among College Students: Using Smartphones Effectively for Social and Educational Needs," Issues in Information Systems, vol. 17, no. 4, p8-20, 2016.

[10] M. J. Duran, F. Barrero, I. Gonzalez-Prieto, H. Guzman, A. Pozo; M. Bermudez and C. Martin, "A scientific approach in wind energy courses for electrical engineers," 2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE) Seville, *Spain*, 2016, pp. 1-6.

[11] M.J. Duran, S. Gallardo, S.L. Toral, R. Martinez-Torres and F.J. Barrero, "A learning methodology using Matlab/Simulink for undergraduate electrical engineering courses attending to learner satisfaction outcomes," *International Journal of Technology and Design Education*, vol. 17, no. 1, pp. 55-73, 2007.

[12] S.L. Toral, M.R. Martinez-Torres, F. Barrero, S. Gallardo and M.J. Duran, "An electronic engineering curriculum design based on concept-mapping techniques," *International Journal of Technology and Design Education*, vol. 17, no. 3, pp. 341-356, 2007.

[13] S. Gallardo, F. Barrero, S.L. Toral and M.J. Duran, "eDSPlab: A remote-accessed instrumentation laboratory for digital signal processors training based on the Internet," 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics (IECON 2006) Paris, *France*, 2006, pp. 4656-4661.

[14] M.J. Duran, F. Barrero, A. Pozo-Ruz, F. Guzman, J. Fernandez and H. Guzman, "Understanding power electronics and electrical machines in multidisciplinary wind energy conversion system courses," *IEEE Transactions on Education*, vol. 56, no. 2, pp. 174-182, 2013.

[15] S.L. Toral, F. Barrero, M.R. Martinez-Torres, S. Gallardo and M.J. Duran, "Modeling learner satisfaction in an electronic instrumentation and measurement course using structural equation models," *IEEE Transactions on Education*, vol. 52, no. 1, pp. 190-199, 2009.

[16] "Graduadoa_en_Ingenieria_Electrica_Ultima_Memoria_VERIFICADA.pdf"

SESIÓN III.A: AUTOMÁTICA Y ROBÓTICA 1

Crumble como herramienta educativa para introducir en robótica

Pedro Plaza
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Control (DIEEC) (UNED)
Madrid, España
pplaza@plazarobotica.es

German Carro
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Control (DIEEC) (UNED)
Madrid, España
germancf@ieee.org

Manuel Blazquez
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Control (DIEEC) (UNED)
Madrid, España
manuel.blazquez.merino@gmail.com

Elio Sancristobal
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Control (DIEEC) (UNED)
Madrid, España
elio@ieec.uned.es

Manuel Castro
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Control (DIEEC) (UNED)
Madrid, España
mcastro@ieec.uned.es

Félix García-Loro
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Control (DIEEC) (UNED)
Madrid, España
fgarcialoro@ieec.uned.es

Javier Muñoz
Plaza Robotica
Madrid, España
javi@plazarobotica.es

***Abstract*— El objetivo de este artículo es presentar el uso de Crumble, una herramienta emergente, para guiar la introducción a la robótica educativa como el segundo paso para introducir a los estudiantes en la robótica. La robótica requiere varias habilidades tales como el pensamiento sistémico, la mentalidad de programación, el aprendizaje activo, las matemáticas, la ciencia, el juicio y la toma de decisiones, la buena comunicación, el diseño tecnológico, la resolución de problemas complejos y la persistencia. Estas habilidades se pueden desarrollar fácilmente usando Crumble. Los resultados obtenidos del curso de robótica educativa demuestran cómo los niños con experiencia previa en programación usando Scratch, pero sin experiencia con robots pueden continuar el proceso de aprendizaje a través de las experiencias en el aula. El resultado de este trabajo muestra que es mejor adaptar la dificultad a cada uno de los niños. Por último, es importante combinar teoría y práctica con el objetivo de incluir tareas divertidas entrelazadas con los desafíos que se plantean para aplicar la teoría en la resolución de problemas.**

Keywords— educación; programación; robótica; STEM

I. INTRODUCCION

Este trabajo se enmarca en la educación ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM) combinada con la robótica educativa. Además, la robótica combinada con STEM proporciona una manera atractiva de transformar conceptos aburridos en un divertido proceso de aprendizaje. La robótica se está utilizando como la modernización y la mejora para la mayoría de los procesos [1]. Por lo tanto, hay una necesidad de formación en el contexto de la robótica.

La tecnología se está mejorando y expandiendo día a día y cada vez más en nuestra vida cotidiana. Internet, las redes sociales, la conectividad y los dispositivos móviles nos llevan a un mundo cada vez más conectado, lo que ha generado un gran cambio en nuestra manera de relacionarnos y comunicarnos. Este escenario hiperconectado está afectando a las relaciones entre individuos y está introduciendo nuevas oportunidades y nuevos retos [2].

La educación STEM es una herramienta poderosa que está siendo más popular en estos días [3]. La educación primaria se enfrenta al desarrollo del pensamiento STEM y las actitudes favorables al STEM en alumnos de edades tempranas. [4] describe el diseño, implementación y evaluación de una solución para abordar ambos temas. [5] proporciona ideas y resalta futuras orientaciones sobre muchos aspectos interesantes: métodos pedagógicos innovadores (incluida la evaluación) y herramientas, aspectos de la comunidad, aspectos de diseño curricular y aspectos de diseño instructivo que consideran los recursos de la UMI (Ubiquitous computing, Mobile Computing and the Internet of Things) para mejorar la educación STEM. La tecnología educativa es una herramienta con gran potencial que aumenta su presencia día a día. Algunos ejemplos son los proporcionados por [6] como parte de la red eMadrid.

Sin embargo, la introducción a la robótica no es una tarea sencilla. En primer lugar, la robótica combina mecánica, electricidad, electrónica e informática con el propósito de diseñar y construir aplicaciones robóticas. Los robots son máquinas electromecánicas programables que incluyen sensores para tomar decisiones y adaptarse a diferentes situaciones.

Además, la robótica también proporciona una forma atractiva de transformar conceptos aburridos en un divertido proceso de aprendizaje. Los kits robóticos facilitan la facilidad con la que los estudiantes pueden hacer conexiones entre las disciplinas STEM [7]. La robótica está siendo utilizada como la modernización y mejora de la mayoría de los procesos. Esto ocurre porque los robots pueden integrarse fácilmente en los procesos industriales actuales [8]. [9] demostró que los niños pueden aprender programación básica con Scratch. [10] describe un campamento que dio a los estudiantes de secundaria la oportunidad de colaborar con sus compañeros, en

un entorno universitario, en la construcción y programación de robots. Los resultados de [11] indican una reacción positiva cuando los alumnos se ven expuestos a la programación utilizando Scratch Software como preludio de la introducción de la robótica con las unidades LEGO NXT. También describe un campamento de verano de robótica. Además, los autores evalúan mediante el uso de encuestas previas y posteriores a las pruebas que incluyen preguntas de contenido e interés. Los resultados de la encuesta del campamento sugieren que la asistencia al campamento tuvo un efecto significativo en la matriculación de los estudiantes participantes en la universidad.

Es trabajo consistió en el diseño, implementación y análisis de resultados de un curso para introducir a niños en la robótica. Este curso parte de una primera fase en la cual se diseñó, implementó y analizó los resultados de un curso para introducir a niños en la robótica usando la herramienta Scratch [12]. En esta segunda fase se ha usado Crumble como herramienta que proporciona a los estudiantes habilidades tales como el pensamiento sistémico, la mentalidad de programación, el aprendizaje activo, las matemáticas, la ciencia, el juicio y la toma de decisiones. comunicación, diseño de tecnología, resolución de problemas complejos y persistencia.

Este artículo está dividido en 5 secciones. La sección describe la herramienta de robótica educativa Crumble. Esta sección incluye tanto información del fabricante, como detalles del entorno de programación. Además, se incluye un conjunto de elementos hardware que distribuye el fabricante de Crumble. La Sección III resume el curso. Esta sección incluye la ubicación y los recursos empleados. También se describe la estructura del curso. Al final de esta sección se presentan los resultados. En la sección IV se analizan los resultados obtenidos. La última sección recoge las conclusiones del material presentado.

II. CRUMBLE, ELECTRÓNICA Y PROGRAMACIÓN AL ALCANCE DE LA JUVENTUD

Crumble es una tarjeta electrónica a la que se pueden conectar hasta dos motores, luces, interruptores y sensores para controlar su funcionamiento. Se conecta al PC a través de USB y puede programarlo mediante el software gratuito. Redfern Electronics se encarga de fabricarlos y se pueden obtener algunos accesorios que son compatibles con la tarjeta Crumble [13].

A. Empezando con Crumble y recursos de referencia

La controladora de Crumble es una tarjeta basada en un microcontrolador PIC de Microchip. Tal y como se describe en [14], esta tarjeta combina facilidad de uso con un gran número de características que la hacen apta para su uso en un entorno de educación STEM. Cabe destacar que incluye dos puertos de alimentación de entrada conectados internamente que pueden alimentarse con un nivel de tensión de 4,5 a 5,5 V DC (corriente continua). Estos puertos están marcados como POWER en la PCB (placa de circuito impreso) con su polaridad (+ y -). Por otro lado, la tarjeta dispone de un puerto USB tipo C utilizado para programar. También hay dos puertos de salida que pueden controlar motores DC de hasta 1 A DC. Los motores pueden ser gestionados en ambas direcciones. Además, las salidas del motor pueden actuar como salidas de alta potencia para muchos tipos de dispositivos. Estos puertos están marcados como MOTOR DRIVERS 1 y 2 en la PCB (placa de circuito impreso) con su polaridad (+ y -). Además, se pueden usar hasta cuatro puertos de entrada o salida que pueden ser utilizados como puertos analógicos o digitales. Estos puertos están marcados como A, B, C y D en la PCB (placa de circuito impreso).

La Figura 1 muestra la tarjeta Crumble y los diferentes puertos.

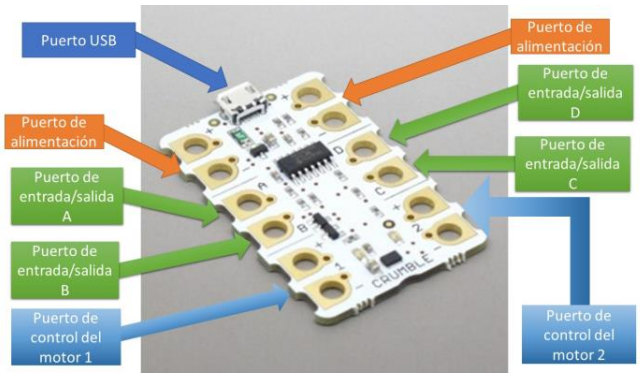


Fig. 1. Puertos de la tarjeta Crumble.

B. El entorno de programación

No se requiere experiencia en programación, un sistema gráfico de arrastrar y soltar inspirado en el software MIT Scratch se proporciona libremente.

La interfaz de programación es un software de programación de bloques que se divide en tres zonas: pulsadores de inicio de programa / parada de programa, panel de comandos y panel de programación. La Figura 2 muestra una instantánea del software Crumble. También se incluye un programa simple.

El programa representado está destinado a:

1. Inicio del programa.
2. Parar motores 1 y 2, y fijar el primer Sparkle al color rojo.
3. Esperar 1 segundo.
4. Ejecutar un bucle infinito los siguientes comandos:
    a. Fijar el sentido de los motores 1 y 2 en avance a una potencia del 75 % y fijar el primer Sparkle al color verde.
    b. Esperar 1 segundo.
    c. Fijar el primer Sparkle al color naranja y fijar el sentido del motor 2 en retroceso a una potencia del 75 %
    d. Esperar 1 segundo.



Fig. 2. Ejemplo de programa con Crumble.

Hay seis categorías de comandos: Básico, Entrada/Salida, Destellos, Control, Variables y Operadores. Cada grupo contiene comandos que tienen algún tipo de relación.

C. Elementosexternos de hardware

La placa de Crumble es capaz de manejar dos motores de corriente continua de manera independiente. Esto se debe a que tiene dos puertos dedicados al control de motores.

Por otro lado, el Puerto D es capaz de manejar hasta 32 Sparkles independientemente cuando estos Sparkles se conectan en serie. Los Sparkles son placas de LED RGB (Rojo, Verde y Azul). El controlador Crumble puede gestionar de forma independiente hasta 32 Sparkles y usar una resolución de color de 16 bits.

Además, los servomotores pueden ser gestionados por la controladora Crumble. La señal de control del servomotor tiene que estar conectada a los puertos A, B, C o D. Se pueden controlar hasta cuatro servomotores a la vez.

También, Crumble se puede usar para realizar lecturas de un sensor de ultrasonidos. Un sensor de ultrasonidos es un dispositivo para medir distancias. Su funcionamiento se base en el envío de un pulso de alta frecuencia, no audible por el ser humano. Este pulso rebota en los objetos cercanos y es reflejado hacia el sensor, que dispone de un micrófono adecuado para esa frecuencia. l sensor se basa simplemente en medir el tiempo entre el envío y la recepción de un pulso sonoro. Sabemos que la velocidad del sonido es 343 m/s en condiciones de temperatura 20 ºC, 50% de humedad, presión atmosférica a nivel del mar. Cuando se usa este sensor con Crumble, sólo hay que conectar un puerto de la controladora al disparador y otro puerto al eco del sensor. Mediante un sencillo comando de Crumble donde se le indica qué puerto está conectado al disparador y qué puerto está conectado al eco, el comando devuelve el valor de distancia a objeto en centímetros.

Finalmente, se puede conectar un módulo de seguimiento de línea a dos de los puertos A, B, C y D en la Crumble. Los sensores infrarrojos son unos componentes electrónicos compuestos normalmente de un LED infrarrojo y un fototransistor colocados uno al lado del otro, de forma que el LED actúa como emisor y el fototransistor como receptor. El LED infrarrojo emite luz infrarroja, es decir, de mayor longitud de onda (o menor frecuencia) que la que podemos ver los humanos, así que para nosotros es invisible. Si esta luz choca con una superficie blanca se reflejará y llegará al fototransistor. Si por el contrario golpea en una superficie negra, el material absorberá la mayoría de la luz y no llegará al fotorreceptor. Este sensor tiene 3 pines de conexión, + y - para la alimentación y OUT para enviar la señal a la Crumble que nos indicará si está llegando o no el reflejo del LED al fototransistor. Funciona de esta forma:

- Si está llegando la luz al fotorreceptor enviará una señal LOW al exterior.
- Si no está llegando enviará una señal HIGH.

La Figura 3 muestra una construcción básica de robot de ruedas usando Crumble. Este robot incluye una controladora Crumble, un portapilas como sistema de alimentación, dos motores y un Sparkle.

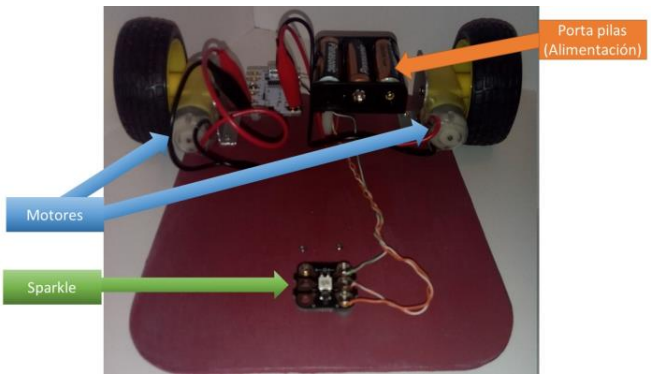


Fig. 3. Ejemplo de robot con Crumble.

III. CURSO CON CRUMBLE

El contexto de este curso es la introducción a la robótica a chicas y chicos, el primer paso se basó en Scratch como una herramienta que proporciona a los estudiantes habilidades tales como pensamiento sistémico, mentalidad de programación, aprendizaje activo, matemáticas, ciencia, juicio y toma de decisiones, buena comunicación, diseño tecnológico, resolución de problemas complejos y persistencia. En esta segunda fase, mediante el uso de Crumble, el objetivo es potenciar las habilidades anteriormente mencionadas. Este curso tiene también como objetivo que las chicas y los chicos se empiecen a familiarizar con elementos hardware comúnmente usados en el área de robótica, tales como sistemas de alimentación, tarjeta controladora, luces, sensores y

actuadores. A lo largo de esta sección, la ubicación y los recursos utilizados se detallan. Además, se describe la estructura del curso. Finalmente, también se incluyen los resultados obtenidos a lo largo del curso.

A. Localización del curso y recursos empleados

El curso tuvo lugar en el centro de La Estera, ubicado en la localidad de Camarma de Esteruelas. Camarma de Esteruelas está situada en la zona oriental de la Comunidad de Madrid. La Estera es un centro sociocultural independiente, autofinanciado por vecinos y es una organización sin fines de lucro.

El aula está formada por mesas en isla. En un lado de la isla se proyecta el material de aprendizaje visual. Por otro lado, el instructor gestiona el ordenador que contiene el material audiovisual, presenta la sesión e interactúa con los niños.

Los alumnos disponen de cuatro ordenadores personales (PC), cada uno de los cuales se utilizan por parejas. Estos PCs ejecutan Ubuntu como el sistema operativo. Este sistema operativo fue elegido por su compatibilidad con Crumble y porque tanto Ubuntu como el entorno de programación de Crumble no requieren gran cantidad de recursos como la velocidad del microprocesador o la memoria RAM (Random-Access Memory). Además, Ubuntu se puede usar gratis. Ubuntu es un sistema operativo basado en GNU/Linux que se distribuye bajo una licencia de software libre y se basa en un sistema gráfico basado en Unity. En la cual se pueden instalar programas de software libre para fines educativos.

B. Perfil de los estudiantes

El grupo de estudiantes estaba formado por ocho estudiantes de 7 a 15 años. Tres estudiantes eran menores de 10 años. Casi la mitad de los estudiantes tenían entre 10 y 15 años. Un estudiante tenía 15 años. La Tabla I resume las calificaciones que tienen los estudiantes. Además, en la Tabla I se incluye la correspondencia entre el nivel educativo español y el nivel ISCED (Clasificación Internacional Normalizada de la Educación).

TABLA I. GRADOS DE LOS ESTUDIANTES

Grado educativo español	Nivel ISCED	Número de estudiantes
Educación Primaria	1	7
Educación Secundaria	2 and 3	1

C. Estructura del curso

La duración del curso fue de dos meses y el contenido se proporcionó durante dos horas semanales. El curso se dividió en dos partes, la primera de ellas se centró en obtener conocimientos sobre la herramienta Crumble y la segunda parte se alineó con la construcción de aplicaciones mediante actividades de resolución de problemas. El curso comprende un total de 16 horas. Los contenidos de la sesión fueron diseñados con el objetivo de combinar teoría y práctica. La teoría se desplegó durante los primeros 40 minutos de la sesión y el resto del tiempo se dedicó exclusivamente a la resolución de problemas de forma práctica para aplicar los conceptos teóricos explicados previamente.

La tabla II enumera las sesiones que forman el curso. Además, se incluye la temática de cada una de dichas actividades. Es decir, los conocimientos que se pretende que adquieran los alumnos durante la realización de cada una de las sesiones.

TABLA II. TÍTULOS Y OBJETIVOS DE LAS SESIONES.

Título de la sesión	Objetivos de la sesión
Conociendo Crumble (I)	Conocer Crumble, nociones de electricidad, nociones de electrónica y programar un robot.
Conociendo Crumble (II)	Repasar Crumble, física con robots, profundizar en robótica y trabajo en equipo.
Conociendo Crumble (III)	Profundizar en Crumble, nociones de programación, uso de variables y trabajo en equipo.
Conociendo Crumble (IV)	Repasar Crumble, repasar giros del robot, repasar variables y operadores, y profundizar en robótica.
Controlando al robot	Profundizar en Crumble, profundizar en robótica, trabajo en equipo y trabajo por objetivos.
Sigue líneas	Profundizar en Crumble, profundizar en robótica, trabajo en equipo y trabajo por objetivos.
Esquivando obstáculos	Profundizar en Crumble, profundizar en robótica, trabajo en equipo y trabajo por objetivos.
Competición	Repasar Crumble, física con robots, profundizar en robótica y trabajo en equipo.

Todas las actividades indicadas en la tabla I están compuestas por los siguientes contenidos:

- Conociendo Crumble (I): esta sesión cubre un resumen de las principales características del hardware y del software de Crumble. Además, se introdujeron algunos elementos básicos de un robot: sistema de alimentación, motores y luces LED (Light Emitter Diode), Durante esta sesión se hicieron unas sencillas tareas de programación de un robot de ruedas. En primer lugar, los alumnos tenían que mover el robot hacia delante y hacia atrás. Posteriormente, programaron el robot para describir una trayectoria en forma de U Finalmente, los alumnos programaron la tarjeta Crumble para encender un Sparkle.
- Conociendo Crumble (II): al comienzo de la sesión, se revisaron los contenidos mostrados en la sesión anterior. Después de esto, se propuso una actividad en la que tenían que combinar movimientos del robot con aspectos de color del Sparkle. A continuación, se trabajaron conceptos como la velocidad del robot y los giros que se pueden hacer con el tipo de robot usado. Por último, los alumnos programaron el robot para que circulase por un circuito rectangular.
- Conociendo Crumble (III): esta sesión introduce variables y operadores. Se llevaron a cabo algunas

actividades como operaciones con variables, variables para controlar la potencia de los motores del robot y color del Sparkle en función del valor de las variables. Para finalizar la sesión se trabajaron tareas de coordinación de movimientos de los robots. Por un lado, que los robots describan círculos sin chocarse. Por otro lado, que los robots describan círculos concéntricos de diferente radio.

- Conociendo Crumble (IV): esta sesión comienza con un repaso de las dos sesiones anteriores. Se propone programar el robot para que describa una trayectoria en forma de espiral. También se plantea que intercambien las variables de control de los motores y analicen el resultado de ese cambio. Un penúltimo reto es lograr que el robot del alumno sea capaz de describir una trayectoria en forma de 8. Como última actividad, el robo debe describir una trayectoria en forma de trébol.
- Controlando al robot: en esta sesión se presentaron los puertos de entrada de la tarjeta Crumble. Para ello, se analiza un sencillo programa. Posteriormente, se propone que se actúe sobre el motor 1 cuando la entrada B de la tarjeta Crumble esté activa, y se actúe sobre el motor 2 cuando la entrada C de la tarjeta Crumble esté activa. Tras esta actividad, se propone una tarea similar, pero en lugar de actuar sobre los motores, se actúe sobre el Sparkle cambiando entre aspecto fijo y aspecto intermitente. Para dotar de interactividad con el robot, los alumnos construyen un mando con botones. Usando el mando, los alumnos fijan la potencia de los motores en función del tiempo que se están pulsando los botones. También aplican modificaciones para hacer uso de variables. Por último, realizan navegación del robot haciendo uso del mando.
- Sigue líneas: se hizo una introducción a los sensores. Para esta sesión, los objetivos eran: programar un robot de seguimiento de línea y la modificación del script para que dos usuarios puedan competir. Una vez que los estudiantes terminaron sus proyectos, estaban probando los proyectos de otros estudiantes.
- Esquivando obstáculos: una descripción detallada de los sensores que se conocían. Esta sesión fue similar a la anterior, pero los estudiantes fueron desafiados a conseguir un robot capaz de evitar obstáculos. También modificaron su proyecto con el objetivo de permitir que dos usuarios puedan competir. Una vez que los estudiantes terminaron sus proyectos, estaban probando los proyectos de otros estudiantes.
- Competición: a lo largo de esta última sesión se repasó el contenido de las dos sesiones anteriores. Los alumnos trabajaron todos los conceptos aprendidos en las sesiones anteriores para programar el robot con el fin de seguir el trazado de una línea negra sobre un fondo blanco. Se construyeron diferentes tipos de circuitos: un circuito circular, un circuito rectangular, circuitos con líneas discontinuas y circuitos con trazados en zig zag. También se añadieron obstáculos en los circuitos. Estos obstáculos tenían que ser detectados y esquivados por los robots.

D. Resultados del curso

Tal y como se expone en los contenidos de las sesiones, se pueden llevar a cabo diferentes tipos de actividades con el objetivo de proporcionar conocimientos sobre STEM utilizando tareas sencillas y actividades orientadas a proyectos.

Los estudiantes no tenían experiencia previa en el uso de Crumble. Aun así, si tenían experiencia previa en programación a través del curso anterior de Scratch. Durante las sesiones, el instructor orientó a los alumnos a través de los contenidos teóricos y los retos propuestos. La sesión de cada día comenzó con una breve discusión sobre el contenido de la sesión anterior. El instructor también observó un cambio en las preguntas hechas por algunos de los estudiantes, tanto al conectar las experiencias de la actividad con ejemplos del mundo real como al tratar de entender los conceptos subyacentes.

Durante las primeras cuatro sesiones, los estudiantes estaban tratando con el entorno de Crumble. El entorno de programación es más sencillo que el de Scratch, véase la sección II B. donde se incluye un resumen. Aun así, con Crumble, a diferencia de Scratch, entran en juego elementos hardware. A lo largo de estas sesiones, el instructor estuvo conduciendo a los estudiantes para cubrir completamente el contenido. Por lo tanto, todos los estudiantes completaron las tareas asignadas. Algunos de ellos sin ayuda, otros necesitaban algunas aclaraciones sobre los objetivos de la actividad y cómo resolverlos. La Tabla III incluye información sobre las actividades realizadas en cada una de las sesiones de Conociendo Crumble (I), Conociendo Crumble (II), Conociendo Crumble (III) y Conociendo Crumble (IV) respectivamente y cuántos alumnos completaron cada una de estas actividades sin ayuda, con alguna ayuda o no completado sin supervisión por parte del instructor con el fin de completar la actividad correspondiente. Hubo diversidad de resultados en cada uno de los desafíos propuestos. En algunas actividades, la mayoría de los participantes necesitaron algún tipo de aclaración sobre los objetivos de cada actividad. En otros casos, no se necesitaba ayuda o aclaración por parte del instructor. Muy pocos estudiantes en cualquier actividad requerían supervisión para completarla. Un dato importante que se observó es que a medida que se iba trabajando sobre las actividades, el nivel de ayuda requerida por parte de los estudiantes era cada vez menor. Cuanto más trabajan con Crumble, los alumnos ganaban un mayor grado de independencia. Una excepción a esta observación fue la actividad S4. La espiral de las variables, donde la mayoría de los estudiantes necesitaron ayuda por parte del instructor para poder completar la actividad.

TABLA III. ACTIVIDADES DE LAS SESIONES DE LA PRIMERA PARTE Y ALUMNOS QUE LAS COMPLETARON.

Actividades de la sesión	Completado sin ayuda	Completado con ayuda	No completado sin supervisión
S1. Primer programa con Crumble	0 (0 %)	6 (75 %)	2 (25 %)
S1 Describiendo trayectorias	2 (25 %)	4 (62.5 %)	2 (25 %)
S1. Usando los Sparkles	2 (25 %)	4 (62.5 %)	2 (25 %)
S1. Programando un robot	0 (0 %)	6 (75 %)	2 (25 %)
S2. La velocidad del robot	0 (0 %)	6 (75 %)	2 (25 %)
S2. Trayectoria circular	2 (25 %)	4 (62.5 %)	2 (25 %)
S2. Velocidad de giro	2 (25 %)	4 (62.5 %)	2 (25 %)
S2. Circuito básico	2 (25 %)	4 (62.5 %)	2 (25 %)
S2. Circuito de velocidad	0 (0 %)	6 (75 %)	2 (25 %)
S3. Operadores con variables	0 (0 %)	2 (25 %)	6 (75 %)
S3. Variables con motores	0 (0 %)	2 (25 %)	6 (75 %)
S3. Variables con Sparkles	0 (0 %)	2 (25 %)	6 (75 %)
S3. Coordinación de movimientos	2 (25 %)	4 (62.5 %)	2 (25 %)
S4. Controlando motores con variables	2 (25 %)	4 (62.5 %)	2 (25 %)
S4. La espiral de las variables	0 (0 %)	2 (25 %)	6 (75 %)
S4. Girando en el otro sentido	6 (75 %)	2 (25 %)	0 (0 %)
S4. Invirtiendo la espiral	6 (75 %)	2 (25 %)	0 (0 %)
S4. Trazada en 8	8 (100 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
S4. Trazada en trébol	4 (50 %)	4 (50 %)	0 (0 %)

Durante la segunda parte del cuso, últimas cuatro sesiones, los estudiantes estuvieron tratando con diferentes actividades orientadas a proyectos usando Crumble. A lo largo de estas sesiones, el instructor estaba conduciendo a los estudiantes para establecer los objetivos del proyecto de la sesión correspondiente. Por lo tanto, todos los estudiantes completaron las tareas asignadas. Algunos de ellos sin ayuda los otros necesitaban algunas aclaraciones sobre los objetivos de la actividad y cómo resolverlos. La Tabla IV incluye información sobre las actividades realizadas en cada una de las sesiones: Controlando al robot, Sigue líneas, Esquivando obstáculos y Competición, respectivamente y cuántos alumnos completaron cada una de estas actividades sin ayuda, con alguna ayuda o no completado sin supervisión por parte del instructor con el fin de completar la actividad correspondiente. En esta segunda parte, también hubo diversidad de resultados en cada uno de los desafíos propuestos. En comparación con la primera parte, los alumnos mostraron un grado de independencia mayor. En algunas actividades, la mayoría de los participantes necesitaron algún tipo de aclaración sobre los objetivos de cada actividad. En otros casos, la mayoría de los casos, los alumnos no necesitaron ayuda o aclaraciones por parte del instructor. Muy pocos estudiantes en cualquier actividad requerían supervisión para completarla. Una excepción a esta observación fueron las actividades S6. Navegando con el robot y S8. Circuito rectangular con obstáculo. En estas actividades, la mayoría de los estudiantes necesitaron algún tipo de ayuda por parte del instructor para poder completar la actividad, o incluso, los estudiantes requirieron ayuda por parte del instructor para poder completar dicha actividad.

TABLA IV. ACTIVIDADES DE LAS SESIONES DE LA SEGUNDA PARTE Y ALUMNOS QUE LAS COMPLETARON.

Actividades de la sesión	Completado sin ayuda	Completado con ayuda	No completado sin supervisión
S5. Navegando con el robot	6 (75 %)	2 (25 %)	0 (0 %)
S5. Variando la velocidad	6 (75 %)	2 (25 %)	0 (0 %)
S5. Prueba cronometrada	8 (100 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
S6. Navegando con el robot	2 (25 %)	4 (62.5 %)	2 (25 %)
S6. Variando la velocidad	6 (75 %)	0 (0 %)	2 (25 %)
S6. Circuito básico	6 (75 %)	2 (25 %)	0 (0 %)
S6. Circuito de velocidad	8 (100 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
S7. Control de distancia	6 (75 %)	0 (0 %)	2 (25 %)
S7. Navegando con el robot	6 (75 %)	2 (25 %)	0 (0 %)
S7. Variando la velocidad	8 (100 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
S7. Circuito básico	6 (75 %)	2 (25 %)	0 (0 %)
S7. Circuito de velocidad	8 (100 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
S8. Circuito circular	6 (75 %)	2 (25 %)	0 (0 %)
S8. Circuito circular con obstáculo	0 (0 %)	2 (25 %)	6 (75 %)
S8. Circuito rectangular	6 (75 %)	2 (25 %)	0 (0 %)
S8. Circuito rectangular con obstáculo	0 (0 %)	2 (25 %)	6 (75 %)
S8. Línea discontinua	8 (100 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
S8. Zig zag	6 (75 %)	0 (0 %)	2 (25 %)
S8. Circuito de velocidad	8 (100 %)	0 (0 %)	0 (0 %)

Los estudiantes aumentaron su motivación para programar y crear proyectos simples. Al principio del curso, todos los estudiantes tenían conocimientos sobre nuevas tecnologías como computadoras, tablets y teléfonos inteligentes, pero estos conocimientos se limitaban a consultas entre redes o juegos. Además, los alumnos contaban con la experiencia previa de un curso de introducción a la robótica usando Scratch que fomentaba habilidades tales como pensamiento sistémico, mentalidad de programación, aprendizaje activo, matemáticas,

ciencia, juicio y toma de decisiones, buena comunicación, diseño tecnológico, resolución de problemas complejos y persistencia. Los estudiantes pudieron desarrollar las habilidades mencionadas anteriormente. Además, el instructor apreció a lo largo del curso como los estudiantes se iban familiarizando con elementos hardware comúnmente usados en el área de robótica, tales como sistemas de alimentación, tarjeta controladora, luces, sensores y actuadores.

IV. DISCUSIÓN

A lo largo de las secciones anteriores, este curso de robótica educativa demuestra cómo los niños con una base en programación y robótica pueden empezar a ampliar conocimientos sobre ambas a través de experiencias en el aula.

La robótica educativa es un término ampliamente utilizado para describir el uso educativo de la robótica como herramienta de aprendizaje. A partir de 2006, como se indica en [15] donde se utilizó LEGO Mindstorms NXT. Este es un ejemplo de robótica educativa. Actualmente, LEGO ha evolucionado el NXT a EV3. Hoy en día, hay una gran variedad de herramientas robóticas como Arduino [16].

Crumble es una buena opción para introducir la robótica debido a su costo, Redfern proporciona la interfaz de desarrollo de forma gratuita y un kit básico tiene un coste de 42 £. Además, el único requisito es el uso de un PC (ordenador personal) o un ordenador portátil. Para que Crumble funcione correctamente, se necesitan los siguientes requisitos mínimos del sistema:

- Sistema Windows: Windows XP SP3 o posterior.
- Sistema Mac OS X: OS X 10.6 (64-bit) o posterior.
- Sistema Linux:
    - Ubuntu 16.04 o posterior.
    - Raspbian Jessie (probado en Pi 3B; Pi 2B; informado en Pi 1B+ y Pi ZERO).

Como se expone en las secciones del curso de Crumble, se muestran diferentes tipos de actividades con el objetivo de proporcionar cómo se puede cubrir la educación STEM usando sesiones simples y efectivas. Estas sesiones contienen teoría, pero la práctica es un factor importante debido a que la edad de los estudiantes requiere que los estudiantes sean parte del proceso de aprendizaje. Además, es importante que los estudiantes encuentren divertidas las actividades para obtener su atención y motivación para el aprendizaje. Los resultados de cada sesión se han resumido en la Tabla III para la primera parte del curso y en la Tabla IV para la segunda parte del curso. A lo largo de las sesiones, algunos estudiantes pudieron completar las actividades propuestas sin la ayuda del instructor. La mayoría de los estudiantes pudieron completar las actividades con algún tipo de ayuda. Además, algunos estudiantes necesitaban el apoyo del instructor para completar las actividades asignadas. La necesidad de ayuda no estaba relacionada con la edad de los estudiantes. Es decir, no porque eran más jóvenes necesitaban más ayuda.

Los estudiantes disfrutaron sus actividades y aprendieron mucho de la experiencia. Además, mejoran sus habilidades relacionadas con STEM.

V. CONCLUSIONES

El resultado de la investigación muestra una herramienta que puede ser usada en aulas para elaborar programas educativos relacionados con robótica en un entorno de desarrollo colaborativo para potenciar la innovación y la motivación de los alumnos durante el proceso de aprendizaje. Además, este trabajo muestra que es mejor hacer desafíos muy fáciles para adaptar la dificultad a cada uno de los niños. También es importante combinar teoría y práctica con el objetivo de incluir tareas divertidas entrelazadas con los desafíos que se plantean para aplicar la teoría en la resolución de problemas. En conclusión, se ha demostrado que Crumble es una buena opción cuando se trata de introducir la robótica de una manera económica, simple y conveniente para que los profesores desarrollen conceptos escalables. Además, los estudiantes encuentran que la programación con Crumble es una actividad agradable mientras adquieren los conceptos STEM.

Finalmente, los resultados se integrarán en una plataforma Open Hardware que favorece la innovación y motivación de los alumnos durante el proceso de aprendizaje [17]. La plataforma que se está desarrollando presenta conexiones inalámbricas como Bluetooth y WiFi como mejoras [18]. Esta investigación continúa el desarrollo descrito en [19]. La tesis doctoral se está llevando a cabo en la Facultad de Ingeniería Industrial de la UNED (Universidad Politécnica Española de Educación a Distancia) y en el Departamento de Ingeniería Eléctrica e Informática (DIEEC).

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen el apoyo prestado por la Escuela Industrial de Ingeniería de la UNED, la Escuela de Doctorado de la UNED y el "Techno-Museo: Discovering the ICTs for Humanity" (IEEE Foundation Grant #2011-118LMF).

Y el apoyo parcial del proyecto eMadrid (Investigación y Desarrollo de Tecnologías Educativas en la Comunidad de Madrid) - S2013/ICE-2715, proyecto IOT4PYME (Internet de las cosas para la pequeña y mediana empresa europea), Erasmus+ Asociación Estratégica nº 2016-1-IT01-KA202-005561), mEquity (Impulso de la calidad de la educación superior en Jordania mediante el uso de las tecnologías móviles para una mejor integración de los grupos desfavorecidos en Jordania.

Los autores también agradecen a La Estera su colaboración.

REFERENCIAS

[1] G. Carro, S. Martin, E. Sancristobal, F. Mur and M. Castro, "Robotics, the New Industrial Revolution," in IEEE Technology and Society Magazine, vol. 31, no. 2, pp. 51-58, Summer 2012. DOI: 10.1109/MTS.2012.2196595

[2] M. Settembre, "Towards a hyper-connected world," 2012 15th International Telecommunications Network Strategy and Planning

Symposium (NETWORKS), Rome, 2012, pp. 1-5. DOI: 10.1109/NETWKS.2012.6381667

[3] T. A. Pickering, T. T. Yuen and T. Wang, "STEM conversations in social media: Implications on STEM education," 2016 IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE), Bangkok, 2016, pp. 296-302. DOI: 10.1109/TALE.2016.7851810

[4] D. Kintsakis and M. Rangoussi, "An early introduction to STEM education: Teaching computer programming principles to 5th graders through an e-learning platform: A game-based approach," 2017 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), Athens, 2017, pp. 17-23. DOI: 10.1109/EDUCON.2017.7942816

[5] A. Mavroudi et al., "Motivating students with Mobiles, Ubiquitous applications and the Internet of Things for STEM (MUMI4STEM)," 2017 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), Athens, 2017, pp. 37-38. DOI: 10.1109/EDUCON.2017.7942820

[6] C. Delgado Kloos, P. Rodríguez, Á. Velázquez-Iturbide, M. C. Gil, B. Fernández-Manjón and E. Tovar, "Digital education in the classroom," 2017 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), Athens, 2017, pp. 31-32. DOI: 10.1109/EDUCON.2017.7942818

[7] G. Carro, M. Carrasco, P. Plaza, M. A. Cañas, E. Sancristobal, M. Castro, et al., "Mechatronics and robotics as motivational tools in remote laboratories," 2015 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), Tallinn, 2015, pp. 118-123. DOI: 10.1109/EDUCON.2015.7095960.

[8] G. Carro, S. Martin, E. Sancristobal, F. Mur and M. Castro, "Robotics, the New Industrial Revolution," in IEEE Technology and Society Magazine, vol. 31, no. 2, pp. 51-58, Summer 2012. DOI: 10.1109/MTS.2012.2196595.

[9] A. Funke, K. Geldreich and P. Hubwieser, "Analysis of scratch projects of an introductory programming course for primary school students," 2017 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), Athens, 2017, pp. 1229-1236. DOI: 10.1109/EDUCON.2017.7943005

[10] I. J. Balaguer Álvarez, "Introduction to Robotics: Importance of a Summer Camp as a Recruiting Tool for Future University Students," in IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologias del Aprendizaje, vol. 12, no. 2, pp. 71-75, May 2017. doi: 10.1109/RITA.2017.2697739

[11] R. N. Beyers and L. van der Merwe, "Initiating a pipeline for the computer industry: Using scratch and LEGO robotics," 2017 Conference on Information Communication Technology and Society (ICTAS), Umhlanga, 2017, pp. 1-7. DOI: 10.1109/ICTAS.2017.7920646

[12] P. Plaza, E. Sancristobal, G. Carro, M. Castro, M. Blazquez, J. Muñoz and M. Álvarez, " Scratch as educational tool to introduce Robotics," 2017 International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL), Budapest, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-73210-7_1

[13] Redfern electronics [Online]. Disponible en: http://redfernelectronics.co.uk/, visitado en 18 de febrero de 2018.

[14] P. Plaza, E. Sancristobal, G. Carro and M. Castro, "Home-made robotic education, a new way to explore," 2017 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), Athens, 2017, pp. 132-136. DOI: 10.1109/EDUCON.2017.7942837

[15] R. Gale, T. Karp, L. Lowe and V. Medina, "Generation NXT," 2007 IEEE Meeting the Growing Demand for Engineers and Their Educators 2010-2020 International Summit, Munich, 2007, pp. 1-13.DOI: 10.1109/MGDETE.2007.4760354

[16] A. Araújo, D. Portugal, M. S. Couceiro and R. P. Rocha, "Integrating Arduino-based educational mobile robots in ROS," 2013 13th International Conference on Autonomous Robot Systems, Lisbon, 2013, pp. 1-6. DOI: 10.1109/Robotica.2013.6623520

[17] P. Plaza, E. Sancristobal, G. Carro, M. Castro and C. Pérez, "Collaborative robotic educational tool based on programmable logic and Arduino," 2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE), Seville, 2016, pp. 1-8. DOI: 10.1109/TAEE.2016.7528380

[18] P. Plaza, E. Sancristobal, G. Carro and M. Castro, "A Wireless robotic educational platform approach," 2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), Madrid, Spain, 2016, pp. 145-152. DOI: 10.1109/REV.2016.7444455

[19] P. Plaza, E. Sancristobal, G. Carro and M. Castro, "Robotic Educational Tool to engage students on Engineering," 2016 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), Eire, PA, 2016, pp. 1-4. DOI: 10.1109/FIE.2016.7757417

Aprendizaje mediante prácticas coordinadas en asignaturas de Grado de Ingeniería

Alberto Daza-Márquez; Raquel Fernández-Ramos; Rafael de Jesús Navas-González
Departamento de Electrónica
Universidad de Málaga
Andalucía Tech. Málaga, España
alma@uma.es; ramos@uma.es; rjnavas@uma.es

***Resumen*— En la presente comunicación expondremos las características principales de la coordinación de los contenidos prácticos entre las asignaturas "Sistemas Electrónicos" e "Instrumentación y Acondicionamiento de la Señal" del Grado de Ingeniería en Electrónica, Robótica y Mecatrónica (GIERM), orientada a la mejora de la calidad del aprendizaje, e impulsada por el hecho de que esta misma experiencia se llevó a cabo entre asignaturas de cursos inferiores y se ha constatado el éxito, como se expuso en un trabajo previo presentado en TAEE 2016. Dicha coordinación se basa en crear una continuidad entre las asignaturas mediante la reutilización de conceptos y módulos elaborados en proyectos prácticos de cursos anteriores, unidos a propuestas de diseños nuevos y más complejos para la asignatura "Instrumentación y Acondicionamiento de la Señal". La medición de resultados se realizará en base a tasas de éxito y rendimiento de los estudiantes, calificaciones, y encuestas SEEQ (Students' Evaluation of Educational Quality) de satisfacción de los mismos.**

Palabras claves*— *Mejora calidad docente; coordinación prácticas; aprendizaje basado en proyectos; sistemas sobre FPGA

I. INTRODUCCIÓN

En la titulación de grado de Ingeniería en Electrónica, Robótica y Mecatrónica (GIERM) coexisten diversas asignaturas en diferentes cursos académicos implicadas en el diseño digital, como son las obligatorias Electrónica Digital (ED) de 2º curso y Sistemas Electrónicos (SSEE) de 3er curso, así como Instrumentación y Acondicionamiento de la Señal (IAS), optativa de 4º curso. En un artículo previo presentado por los autores en el congreso TAEE 2016 [1] se explicó el despliegue inicial de una nueva experiencia de coordinación entre dichas asignaturas, la cual proponía integrar y enlazar las prácticas a lo largo de los cursos y medir el resultado de dicha propuesta a través del análisis de los resultados académicos, así como a través de encuestas de satisfacción a los estudiantes.

En esta comunicación nos centraremos en la coordinación entre las dos asignaturas de cursos más avanzados, SSEE e IAS, de 3er y 4º curso respectivamente, mostrando el mecanismo de integración entre ambas asignaturas, así como los primeros resultados y conclusiones tras el paso de los estudiantes por el ciclo completo de las tres asignaturas que componen la experiencia descrita.

Mostraremos inicialmente la problemática de la integración entre SSEE e IAS, así como los nexos de unión entre ambas y el ámbito académico en el que se desarrolla la experiencia. Seguidamente se detallarán las propuestas de coordinación e integración de prácticas llevada a cabo en las dos asignaturas. A continuación, en el apartado de resultados y discusión, mostraremos la evolución de algunos índices académicos, como son la tasa de éxito y rendimiento, antes y después de la aplicación de la integración vertical, así como la medida de algunos indicios que nos pueden señalar la mejora en los resultados de aprendizaje de los alumnos y alumnas. Del mismo modo, expondremos la opinión recabada de los estudiantes sobre esta experiencia de integración a través de encuestas de satisfacción, siguiendo el modelo SEEQ (Students' Evaluation of Educational Quality) [2] y puntuadas en una escala Likert del 1 al 5. Para finalizar, presentaremos las principales conclusiones a las que hemos llegado, así como las líneas de trabajo futuro que nos aguardan.

II. MOTIVACIÓN, OBJETIVOS Y ÁMBITO ACADÉMICO

A. Motivación de la experiencia desarrollada

El curso 2014/15 fue el primer año en el que un estudiante de la titulación de GIERM había podido cursar las tres asignaturas implicadas en la experiencia, y comenzamos a detectar una problemática en el hilo formativo del estudiante: había cierta falta de conexión y continuidad entre estas asignaturas, con cantidad de propuestas de diseños digitales en cada una de ellas, lo cual provocaba que el estudiante tuviera una carga creciente de trabajo conforme subía en su itinerario del grado y, además, sintiera que el trabajo desarrollado en cursos anteriores no le resultaba útil para el siguiente.

Detectado dicho problema, había que identificar igualmente los distintos puntos en común entre las asignaturas:

- Desarrollan un itinerario desde los fundamentos del diseño digital, pasando por los sistemas básicos, hasta los de instrumentación y control.
- En las prácticas de todas ellas se proponen proyectos de diseño.
- Emplean un soporte común: Entorno de desarrollo basado en la placa de evaluación de una FPGA (dispositivo digital programable) Nexys 3 [3].

Es por ello que se decidió organizar las prácticas desde una perspectiva global, en torno a proyectos que pudieran ser divididos en bloques funcionales, de diferente complejidad, de modo que su implementación pudiera realizarse de forma parcial y progresiva en cada asignatura.

Centrándonos en las asignaturas de 3er y 4º curso, SSEE e IAS, la coordinación entre ellas debía realizarse a un nivel mucho más alto que con la asignatura de 2º curso, dado que éstas ya se encuentran orientadas al diseño de sistemas más complejos. Por ello, se decidió que, además de compartir un cierto número de módulos comunes entre ambas, también debían compartir conceptos más abstractos. Por tanto, en la asignatura SSEE se introdujeron conceptos como:

- Diseño de *datapath* o camino de datos y de los bloques de control, donde se le orienta al estudiante a la construcción de un sistema complejo.
- Diseño de bloques funcionales como "cajas negras" que formarán parte del *datapath*, encaminados también a la realización de grandes sistemas, los cuales pueden ser de diseño propio o provenir de una librería.
- Diseño de bloques de control, a través del uso de máquinas de estado programadas en lenguaje VHDL, que servirán como control del citado *datapath* con sus bloques funcionales.
- Programación en lenguaje C del mismo tipo de Microcontrolador/DSP utilizado en IAS (MicroBlaze) [4], además de orientar su manejo al tipo de tareas presentes en los sistemas implementados en IAS.

B. *Objetivos generales*

Los objetivos a lograr a través de esta integración de prácticas se resumen en los siguientes puntos:

- Un desarrollo progresivo de las prácticas de electrónica, identificando y proponiendo en cada una de ellas módulos adecuados para cada nivel, reutilizables en cursos superiores.
- Una mejora en la percepción de continuidad y unidad de la materia, abordando proyectos crecientes en complejidad con los que el estudiante experimente un proceso de diseño similar al de un entorno profesional.
- Un aumento en la motivación del estudiante y de la calidad de la enseñanza de la electrónica, que repercuta directamente en mejorar el aprendizaje del estudiante, sus índices académicos, y su interés por la materia.

C. *Ámbito académico*

Esta experiencia se inicia a la vez en el curso 2015/16 en las tres asignaturas involucradas, por lo que hasta el curso 2016/17 no se reciben estudiantes en IAS que han cursado previamente SSEE en 3º, y hasta el curso 2017/18, el actual en el momento de escribir esta ponencia, no se tiene en 4º curso a estudiantes que han participado de la nueva experiencia en las tres asignaturas, por lo que los resultados que se presentarán serán a partir de estudiantes que sólo han podido cursar una asignatura con la nueva experiencia de coordinación.

En la TABLA I se presentan el número de matriculaciones en las asignaturas SSEE e IAS para los diferentes cursos académicos desde 2015. Destacamos tres hechos importantes:

- En el curso 2016/17 se experimentó un fuerte aumento en las matriculaciones de SSEE, llegando a 93 estudiantes, un 55% de incremento.
- En el curso 2017/18, este aumento de matriculaciones se ha trasladado en similar proporción a la asignatura IAS, experimentado casi un 60% de incremento.
- También en el presente curso 2017/18, se ha estabilizado el número de estudiantes matriculados en SSEE, volviendo a una cifra similar a la de 2015/16.

La razón de la fuerte subida de estudiantes en SSEE en el curso 2016/17 fue debida al incremento de repetidores por el ambicioso despliegue inicial de la experiencia en el curso 2015/16, junto con un aumento de primeras matriculaciones.

TABLA I. MATRICULADOS POR ASIGNATURA Y CURSO ACADÉMICO

Curso Académico	**Matriculados en Asignaturas**	
	SSEE	***IAS***
2015/16	60	14
2016/17	93	17
2017/18	55	27

III. PROPUESTAS DE PRÁCTICAS INTEGRADAS

Se detallarán a continuación las diferentes propuestas de prácticas integradas para las asignaturas SSEE e IAS, haciendo especial énfasis en los puntos fuertes de la coordinación entre ambas, así como en los módulos, conceptos y metodologías de diseño compartidas entre ellas.

A. *Prácticas de Sistemas Electrónicos*

En la asignatura SSEE se inició esta experiencia de integración en el año 2015/16 desarrollando una serie de propuestas de proyectos, entre los cuales los alumnos y alumnas debían escoger uno para su implementación de manera individual o por parejas. Esta primera propuesta resultó ser demasiado ambiciosa, ya que carecían de una experiencia previa en diseño de sistemas complejos y provocó una baja tasa de éxito entre los estudiantes de dicho curso.

Esto dio lugar a un replanteamiento de la asignatura para el curso 2016/17, adoptando un esquema más realista y menos ambicioso que el inicial. De esta forma, se pasó de la propuesta de un proyecto final abierto a escoger entre muchas opciones, a la propuesta actual de un conjunto de prácticas semi-guiadas, crecientes en complejidad, que contribuyen de forma gradual a la capacitación para realizar un proyecto complejo.

Algunas de esas propuestas ya se presentaron en [1], las cuales forman parte fundamental de la integración de SSEE con ED. Ahora, en esta comunicación, presentamos dos nuevas ideas de prácticas destinadas a la coordinación e integración vertical con la asignatura IAS, optativa de 4º curso.

La parte práctica de la asignatura SSEE se encuentra formada en la actualidad por 4 prácticas semi-guiadas:

- Comienza el curso con una práctica básica para la implementación y uso de bloques de control PWM, ya desarrollados por ellos en ED el curso pasado.
- En segundo lugar, planteamos un sistema que calcula la media de una serie de datos de entrada, utilizando bloques ya diseñados en ED, como el control de teclado hexadecimal y el de los Displays 7 segmentos. Además, se inicia a los estudiantes en el aprendizaje de bloques más complejos, como conversores binario-BCD y viceversa, módulos aritméticos y bloques de control con máquinas de estados definidas en lenguaje VHDL.
- En la tercera práctica utilizamos el concepto de microcontrolador/DSP, para lo cual nos valemos del *soft-core* MicroBlaze de Xilinx, que lo introducimos en la práctica del *sistema de riego* ya descrita en [1], de manera que el estudiante utiliza bloques ya diseñados previamente en ED, a la vez que aprende a implementar en lenguaje C funciones de los módulos de entrada/salida a través del MicroBlaze.
- En la cuarta práctica se desarrolla sobre la FPGA el módulo *medidor de periodos* de señales, que conectará directamente con el proyecto de IAS *medidor de distancias*, explicado posteriormente. Este módulo estará complementado con un MicroBlaze programado en C para recoger los datos del medidor y mostrarlos al usuario por la pantalla del PC.

Vemos, por tanto, que la coordinación entre SSEE e IAS viene claramente dada por los puntos expuestos en la motivación del proyecto de la presente ponencia: diseño de datapath o camino de datos, diseño de los bloques de control en VHDL, y programación en lenguaje C del MicroBlaze.

A continuación, ampliaremos las prácticas *sistema de riego* y *medidor de periodos*, las cuales vertebran la coordinación y enlace entre las asignaturas presentadas en esta ponencia.

1) Sistema de riego con MicroBlaze

Este diseño ya fue presentado en [1] como un ejemplo fundamental en la coordinación entre las asignaturas ED y SSEE. Para la integración entre las asignaturas SSEE e IAS, la idea que se les presenta a los alumnos es que deben sustituir la funcionalidad de la FPGA, en cuanto a entrada y salida de datos, por un dispositivo microcontrolador MicroBlaze que haga las funciones de comunicaciones con un PC por un puerto serie (UART), por lo que capturará los datos de entrada del usuario a través de un teclado, a la vez que mostrará por la pantalla del mismo PC todos los resultados que antes iban hacia el Display LCD, para lo cual utilizaremos el PC en modo terminal virtual. De esta forma se hace fundamental la programación del MicroBlaze en código C, para que comiencen a tomar contacto y se hagan a la idea de trabajar con un sistema gobernado por el micro con una serie de periféricos, tal y como serán los diseños en la asignatura IAS. Además, programan el código C del MicroBlaze con las mismas técnicas de diseño y con prácticamente el mismo entorno de trabajo (*Xilinx Software Development Kit*, *SDK*) que utilizarán en IAS.

Aplicando esta metodología, el diagrama de bloques de esta práctica sería el mostrado en la Fig. 1. Se aprecia cómo el micro sustituye completamente al teclado hexadecimal de entrada, generando los mismos códigos al pulsar las teclas que se suministraban al anterior bloque *Detector de Teclas*, implementado en la FPGA; al mismo tiempo, se recogen todos los datos del *sistema de riego* (temperatura, humedad, RPM, etc.) cuando una interrupción externa (INTC) avisa al MicroBlaze de que deben ser actualizados por pantalla.

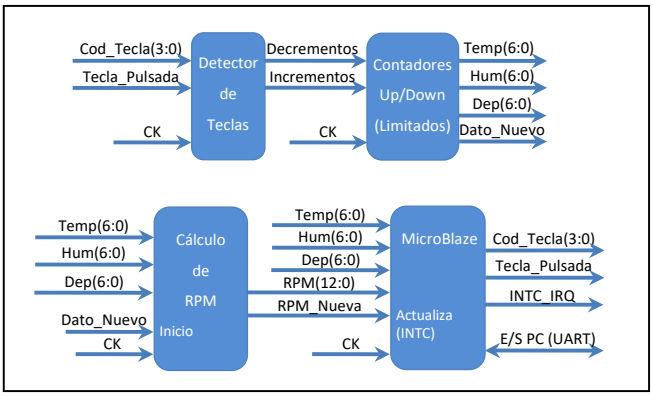


Fig. 1. Diagrama de bloques del sistema de control de riego utilizando MicroBlaze.

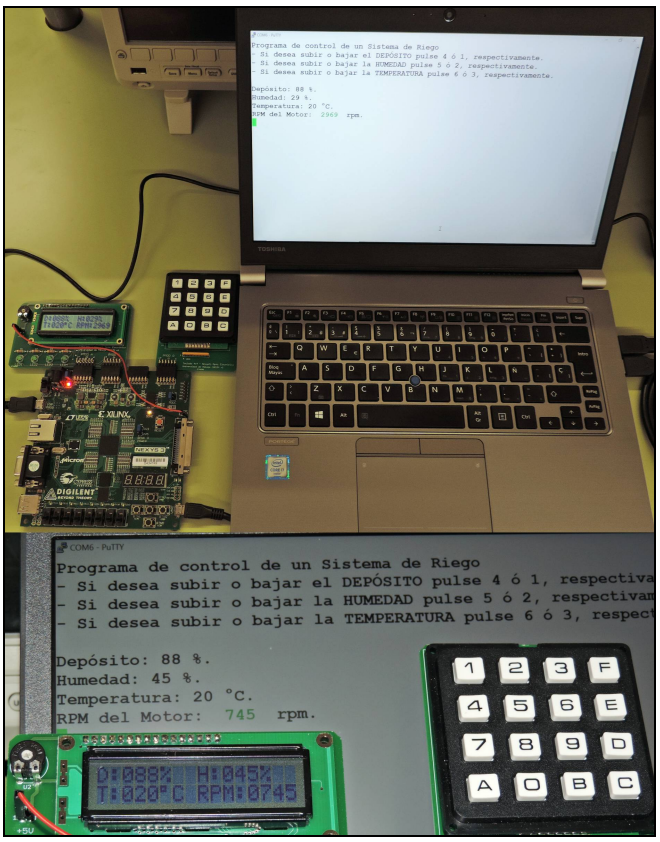


Fig. 2. Implementación del sistema de riego con MicroBlaze.

Este mecanismo de interrupciones, junto al uso de temporizadores (*timers*), es fundamental para el enlace de la asignatura SSEE con IAS, ya que será también la clave para el uso del MicroBlaze en los proyectos, al ser el encargado de coordinar todo el diseño. En el diseño, el temporizador se utilizaría para que el micro realizara un aumento automático de la humedad cuando se está en situación de riego, emulando unas condiciones reales de trabajo. En la Fig. 2 podemos ver una imagen del sistema de riego completo ya implementado.

2) Medidor de periodos con MicroBlaze

Esta nueva práctica ha sido introducida en SSEE en el curso 2017/18 con el objetivo de afianzar los conceptos aprendidos en la práctica anterior y, además, hacer que los estudiantes diseñen un módulo en la FPGA encargado de medir el periodo y los semiperiodos de una señal digital. Dicho módulo será reutilizado directamente en el proyecto *medidor de distancias* de la asignatura IAS, como se explicará posteriormente, mejorando así la continuidad de ambas asignaturas.

El esquema de esta práctica se muestra en la Fig. 3. Vemos cómo la señal digital a la que se le va a calcular el periodo puede provenir del exterior de la FPGA o ser interna a la misma, utilizando por ejemplo los temporizadores del propio MicroBlaze a efectos de calibración del módulo. A partir de la señal de entrada seleccionada, el bloque de la FPGA se encarga de medir el periodo y semiperiodos (a nivel bajo y alto) y, cada vez que se calcula un nuevo valor, se actualizan a la salida del bloque. El MicroBlaze es el encargado de seleccionar cuándo recoge los datos, programado en este caso para que lo realice cada 0.5 segundos a través de un temporizador interno, y muestra dichos datos por la pantalla del PC utilizando un puerto de comunicaciones (UART) para realizar el envío.

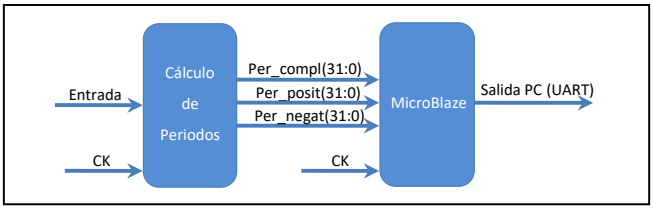


Fig. 3. Diagrama de bloques del medidos de frecuencias utilizando MicroBlaze.

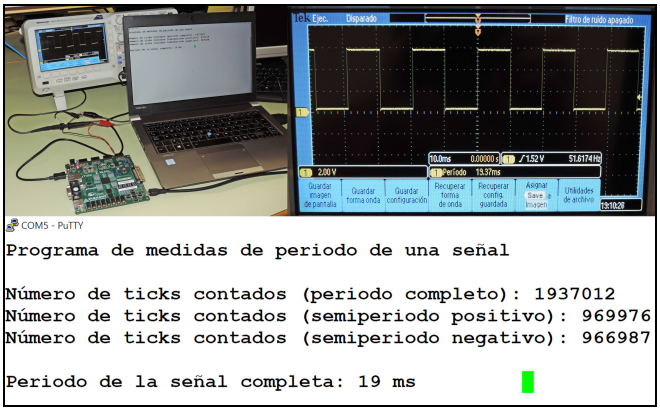


Fig. 4. Implementación y verificación del sistema medidor de periodos con MicroBlaze.

Vemos, por tanto, como en este diseño los estudiantes ponen en práctica todos los conocimientos del curso para desarrollar tanto un bloque hardware dentro de la FPGA, utilizando contadores, sumadores, lógica de control secuencial, etc. (conectando con la asignatura anterior, ED), como código C para el MicroBlaze, siendo ésta la práctica más libre que realicen, debiendo implementarla de forma mucho más autónoma que las anteriores.

En la Fig. 4 observamos la implementación final del diseño, con las medidas de periodo de la señal obtenidas por un osciloscopio y las del propio sistema hardware diseñado.

B. Prácticas y proyectos de Instrumentación y Acondicionamiento de la Señal

Se han diseñado cinco prácticas de laboratorio con distinta complejidad, enfocadas a que los estudiantes apliquen los conocimientos teóricos adquiridos a lo largo de la asignatura, y que permiten desarrollar los proyectos finales. Dichas prácticas son: 1) Introducción al EDK (*Embedded Development Kit*); 2) Sensores Inteligentes; 3) Instrumentación Virtual; 4) Integración de Periféricos; 5) Conversión Analógico- Digital y Digital-Analógico.

Todo el curso ha ido orientado a la realización de los proyectos finales realizados por parejas. Dada que es una asignatura optativa, la motivación del alumnado es primordial si se desea que los alumnos cursen la asignatura. Estos proyectos inciden en dicha motivación, y su interés aumenta cuando el alumno encuentra un hilo argumental que relaciona los conceptos adquiridos anteriormente. Por ello, se ha hecho especial énfasis en los elementos de conexión que se han establecido con las asignaturas anteriormente cursadas.

Básicamente, todos los proyectos propuestos tienen como objetivo el diseño de un instrumento, que se organiza en tres bloques funcionales, según se ilustra en la Fig. 5 (a): (1) Interfaz de usuario en Labview (driver del instrumento); (2) Procesamiento básico con la FPGA; (3) Periféricos y acondicionamiento externo a la FPGA. En la Fig. 5 (b) vemos el detalle del desarrollo interno de la FPGA, usando MicroBlaze y periféricos generados en VHDL.

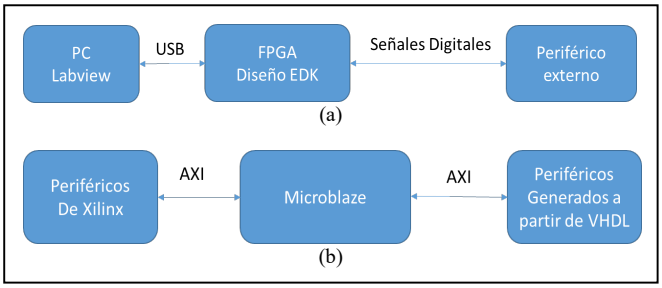


Fig. 5. (a) Estructura de un proyecto en IAS; (b) Diseño interno de la FPGA.

Los proyectos propuestos en IAS, junto con los módulos que se han trabajado en la asignatura SSEE, son los siguientes:

- *Medidor de distancias*. En este proyecto se construye un instrumento para medir distancias mediante un sensor de infrarrojos. Se hace uso de los módulos Medidor de Periodos y Display LCD diseñados en SSEE.

- *Pulsómetro*. El objetivo de este proyecto es medir la frecuencia cardiaca haciendo uso de un sensor óptico reflectivo formado por un diodo emisor de infrarrojos y un fototransistor. Se emplea el módulo Display LCD.
- *Generador de señales por SDD*. En este proyecto se genera una señal con distintas formas de onda mediante el método de Síntesis Digital Directa (SDD). Se utilizan los módulos Generador de Señal y Display LCD.
- *Escáner sónar*. Los alumnos construyen un sistema que mide la distancia a la que se encuentra un objeto en una posición angular concreta, lo que permite obtener un mapa polar de distancias. Se integran los módulos Generador de PWM, Contadores y Display LCD.
- *Balanza electrónica*. En este proyecto los alumnos construyen una balanza con un rango de medida entre 0 y 1 Kg. Se utiliza el Display LCD.
- *Coche a escala*. Se realiza el control de los motores de un coche a escala procesando la información que proporcionan los codificadores ópticos y generando las señales de activación de los motores. Se emplean los módulos Generador PWM, Medidor de Periodos y Display LCD.

A continuación, se ampliarán dos de los citados proyectos: *medidor de distancias* y *pulsómetro*.

1) Medidor de distancias

El objetivo es crear un instrumento que permita la medida de distancias utilizando los siguientes elementos: un sensor con su sistema de acondicionamiento, el Display LCD, la FPGA y el PC, conectados como se muestra en la Fig. 6. El sensor utilizado es el SHARP GP2Y0A21YK0F, que permite medir distancias entre 10 y 80 cm, y tiene como salida una tensión proporcional a la inversa de la distancia, aproximadamente. Para compensar esa no linealidad se usa un convertidor tensión-frecuencia como elemento principal del sistema de acondicionamiento. La medida del periodo de la señal generada se realiza mediante la FPGA, encargándose también de mostrar la información en el Display LCD y de enviar las medidas al PC, mostrándose la información haciendo uso del Labview, donde se diseña el driver del instrumento virtual.

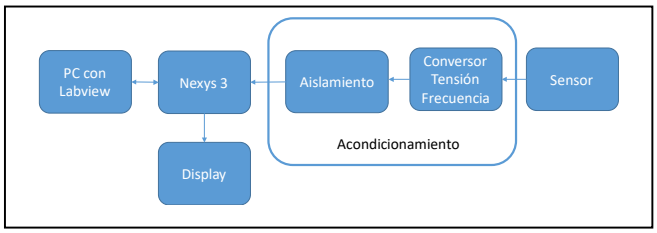


Fig. 6. Elementos que componen el medidor de distancias.

En este proyecto, además del acondicionamiento y de la creación de un instrumento virtual, hay que crear un sistema embebido cuyo elemento principal es el procesador MicroBlaze, constando de 2 partes: el diseño de la arquitectura hardware, y el software que ejecuta dicho micro.

El hardware embebido diseñado se puede ver en la Fig. 7. Los elementos principales son: el procesador MicroBlaze, la memoria RAM y los periféricos. Además, se integran tres periféricos conectados al procesador por medio del bus AXI:

- Axi_Uartlite. Sirve para conectar el MicroBlaze con el puerto serie y así comunicarse con el PC. Este módulo es proporcionado por Xilinx.
- Axi_Contador. Es el contador de periodos, diseñado por los alumnos tomando como base el medidor ya desarrollado en la asignatura SSEE.
- Axi_Display. Controla el Display LCD donde se muestra la medida de la distancia, diseñado por los alumnos a partir del módulo ya estudiado en SSEE.

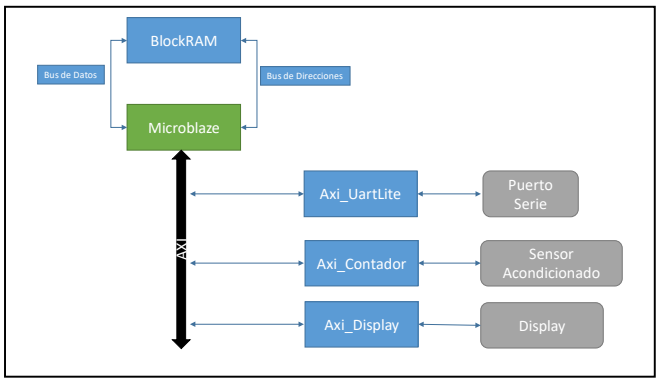


Fig. 7. Arquitectura Hardware del sistema embebido *medidor de distancias*.

Para el citado proyecto, al igual que en el resto de la asignatura IAS, se hace uso del procesador MicroBlaze, que ha sido ampliamente estudiado y programado en la asignatura SSEE, además de los módulos de medida de periodos y control de Display LCD. El uso de estos elementos comunes presenta, entre otras, diversas ventajas: el alumno no pierde tiempo en el rediseño de elementos que no son el objeto principal de la asignatura, pudiendo realizar diseños más complejos; afianza de forma rápida conceptos de diseño aprendidos previamente; percibe una mayor sensación de continuidad en su proceso de aprendizaje. El diseño completo lo observamos en la Fig. 8.

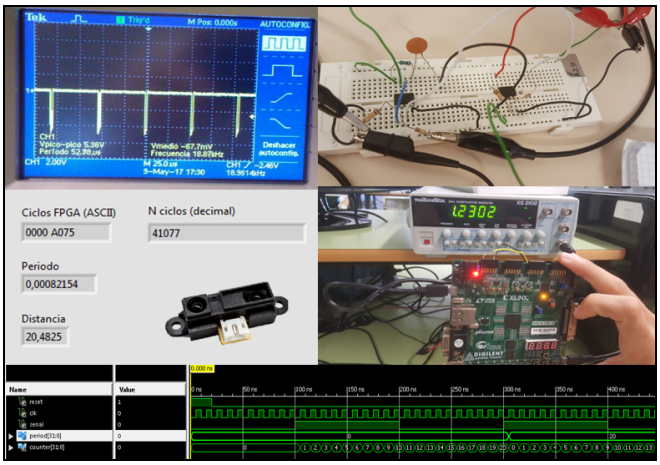


Fig. 8. Implementación del sistema *medidor de distancias*

2) Pulsómetro

En este proyecto se desarrolla un instrumento para visualizar y medir el pulso cardiaco, utilizando elementos similares a los del proyecto *medidor de distancias*, como se aprecia en la Fig. 9: el sensor, con su sistema de acondicionamiento, el Display LCD, la FPGA, el PC y, además, un conversor Analógico-Digital. El sensor utilizado es el TCRT1000, que es un sensor óptico reflectivo compuesto por un diodo emisor y un fototransistor. La señal de salida del sensor es muy pequeña, del orden de los mV, y bastante ruidosa, por lo que se hace indispensable un buen acondicionamiento para poder adquirir la señal y obtener la información del pulso cardiaco.

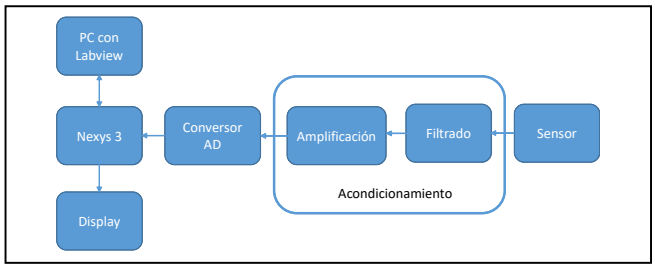


Fig. 9. Elementos que componen el medidor de pulso cardiaco.

De nuevo en este proyecto hay que crear un sistema embebido cuyo elemento principal es el procesador MicroBlaze. El hardware embebido diseñado para este proyecto se puede ver en la Fig. 10, y los elementos principales que lo componen son el procesador MicroBlaze, la memoria RAM y los periféricos. En este proyecto hay que integrar tres periféricos que se conectan al procesador a través del bus AXI:

- Axi_Uartlite. Es el mismo bloque explicado en el proyecto anterior.
- Axi_SPI. Este periférico sirve para comunicar el MicroBlaze con el conversor Analógico-Digital a través del bus SPI. Este módulo es proporcionado igualmente por Xilinx.
- Axi_Display. Es el mismo bloque explicado en el proyecto anterior.

El diseño completo, una vez implementado, lo podemos observar en la Fig. 11.

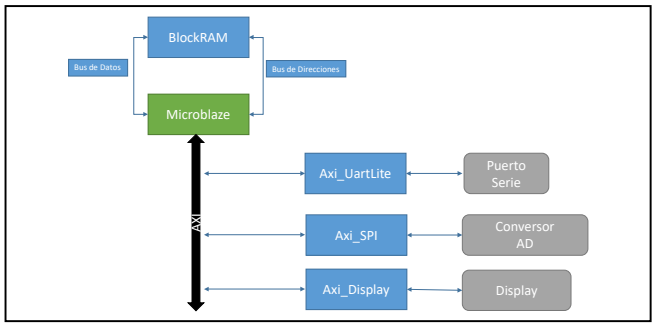


Fig. 10. Arquitectura hardware del sistema *pulsómetro*.

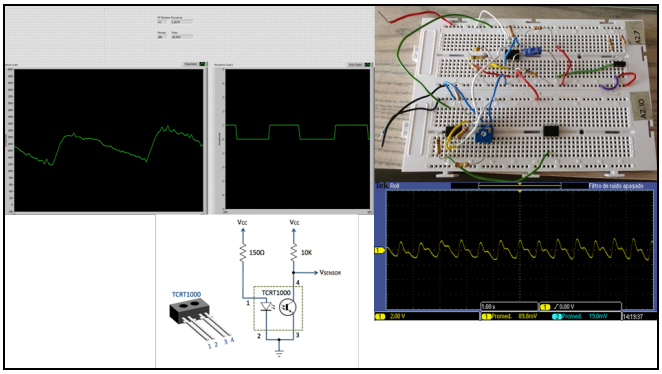


Fig. 11. Implementación del sistema *pulsómetro*

IV. Resultados obtenidos y discusión

La propuesta de integración de prácticas presentada en esta ponencia forma parte de un proyecto de innovación docente bianual que incluye a tres asignaturas: Electrónica Digital (ED) de 2º curso, Sistemas Electrónicos (SSEE) de 3er curso, e Instrumentación y Acondicionamiento de la Señal (IAS) de 4º curso. Esta experiencia comenzó a desplegarse en el curso 2015/16, y en 2016/17 se realizó una remodelación de la misma, tanto en ED como en SSEE, siendo además muy profunda en esta última. Es por ello que, hasta este curso 2017/18, no ha habido estudiantes que hayan podido acceder a IAS cursando toda la experiencia como está configurada en la actualidad y, dado que dicha asignatura es de 2º cuatrimestre, al escribir esta comunicación todavía no se tienen datos del presente curso académico, por lo que no se puede valorar la experiencia en su conjunto, ni a los estudiantes que la han cursado completamente.

Vamos a valorar, aunque sea de manera parcial, los resultados académicos obtenidos en las asignaturas SSEE e IAS, así como los resultados de las encuestas SEEQ disponibles de ambas asignaturas, para ir comprobando el rendimiento académico de los estudiantes y el grado de aceptación de la nueva experiencia entre ellos, analizando a continuación dichos resultados.

A. Resultados académicos.

En la TABLA II se presentan los resultados académicos de la asignatura SSEE. Éstos han sido presentados en otra ponencia remitida por los autores en TAEE 2018 [5], por lo que no nos extenderemos en explicarla en profundidad. Sí comentaremos los aspectos esenciales, que fueron dos:

- En el arranque de la experiencia en el curso 2015/16 hubo un ligero retroceso en los índices académicos respecto al curso 2014/15. Pensamos que, en parte fue debido a la novedad de la propuesta y, también, por un planteamiento inicial quizá demasiado ambicioso, con una propuesta de proyectos que exigía un mayor esfuerzo al estudiante.
- Los índices mejoraron notablemente en el curso 2016/17, a pesar de las circunstancias adversas, con una gran subida en el número de matriculaciones en SSEE.

Creemos que fueron dos los factores que contribuyeron a la mejora en el curso 2016/17:

- El esfuerzo realizado tanto en la revisión del material docente como en la clarificación de las propuestas, más orientadas hacia prácticas semi-guiadas que a proyectos abiertos.
- El impacto de la experiencia en los estudiantes tras su paso por ED, puesto que el 59,1% de los matriculados en SSEE en el curso 2016/17 ya había pasado por la experiencia en ED el curso 2015/16.

Para el curso 2017/18 se aprecia que los principales índices presentan unos resultados similares pero algo inferiores a los del curso anterior, si bien falta por contabilizar la segunda convocatoria donde se prevé que aprobarán algunos estudiantes más, por lo que todo apunta a que las tasas definitivas serán similares o superiores a las logradas en el curso pasado, ya que se ha estabilizado el número de matriculados, se ha podido atender más adecuadamente a los estudiantes por parte del profesorado, y una muy amplia mayoría de los mismos ya han cursado previamente la nueva experiencia en ED.

TABLA II. SSEE: RESULTADOS ACADÉMICOS

Curso Académico	**Índices**		
	Nº de Estudiantes	***Tasa de Rendimiento***	***Tasa de Éxito***
2014/15	36	55,6%	100%
2015/16	60	38,3%	76,7%
2016/17	93	82,8%	88,5%
2017/18	55	78,2%	82,7%

La asignatura optativa de 4º curso IAS partió, en 2014/15, de una situación con pocos estudiantes como se aprecia en la TABLA III, por lo que ese dato no es significativo para realizar las comparaciones. En el curso 2015/16 los alumnos que se matricularon todavía no habían cursado la nueva experiencia en la asignatura SSEE, por lo que creemos les pudo resultar más difícil abordar la asignatura de 4º curso con la nueva metodología, de ahí ese retroceso en los índices académicos.

A partir del curso 2016/17 sí se reciben ya a estudiantes que habían cursado en 2015/16 la nueva experiencia en SSEE, si bien ya hemos descrito que en ese primer año la misma no fue satisfactoria. Sin embargo, los índices académicos para IAS fueron mejores que los del año anterior, consiguiendo una tasa de éxito del 100% (todos los estudiantes presentados superaron la asignatura) y una tasa de rendimiento que sobrepasó el 80%. Pensamos que este aumento es debido, por una parte, a que los alumnos ya venían con la experiencia de trabajar con guiones de prácticas de SSEE y, por otra, a la mejora de los materiales docentes y la revisión de los guiones de prácticas en IAS.

Para finalizar, esperamos que para el actual curso 2017/18 se produzca un mayor avance en la asignatura IAS, dado que recogerá a los estudiantes que cursaron la experiencia de prácticas semi-guiadas en SSEE en 2016/17, orientadas a crear un mayor enlace con IAS, y por tanto debe contribuir a la mejora de estos resultados. No obstante, habrá que estudiar el impacto del gran aumento en el número de matriculaciones, que ha crecido casi un 60% en relación al curso anterior, en parte debido a que IAS recoge el incremento de alumnos y alumnas que se produjo en SSEE en el curso anterior, y en parte debido a que los estudiantes escogen la asignatura porque han estado satisfechos con la misma en cursos anteriores.

TABLA III. IAS: RESULTADOS ACADÉMICOS

Curso Académico	**Índices**		
	Nº de Estudiantes	***Tasa de Rendimiento***	***Tasa de Éxito***
2014/15	3	100%	100%
2015/16	14	71,4%	90,9%
2016/17	17	82,4%	100%
2017/18	27	--	--

B. Encuestas de satisfacción de los estudiantes

Se ha recabado la opinión de los estudiantes a través de encuestas anónimas a partir del modelo de encuestas SEEQ [2], presentadas a través del Campus Virtual (Moodle) o bien realizadas en clase sobre formato de papel. Éstas se han presentado al final del periodo lectivo de cada asignatura y una vez finalizada la evaluación de la misma.

Tanto en SSEE como en IAS sólo se tienen resultados completos de la opinión de los estudiantes para el curso 2016/17, si bien en SSEE se tienen resultados parciales de las encuestas para el actual curso 2017/18 que confirmarían los datos del curso anterior. En SSEE participaron 50 estudiantes, un 53,7% de los matriculados, y en IAS 13 estudiantes, más de un 76% de los matriculados, por lo que podemos considerar los resultados como relevantes.

La encuesta realizada presenta las preguntas en diversas categorías en las que se valoran distintos aspectos de la asignatura. Para la valoración de cada cuestión se establece un rango del 1 a 5, significando “en nada de acuerdo” un 1, y “muy de acuerdo” un 5, si no se indica de otra manera. En las siguientes tablas presentamos una selección de los resultados de las encuestas, pasando posteriormente a su discusión.

TABLA IV. ENCUESTA SEEQ: VALORACIÓN DE LA ASIGNATURA COMPLETA

Cuestiones	**Aprendizaje y Organización**	
	SSEE 16/17	***IAS 16/17***
1. El contenido del curso me ha parecido intelectualmente estimulante e interesante.	4,1	3,8
2. He aprendido cosas que considero valiosas.	4,3	3,9
3. Mi interés por la electrónica ha aumentado como resultado de este curso.	3,9	3,0
4. La materia se ha presentado de forma ordenada y coherente.	4,0	3,7
5. El material de la asignatura estaba bien preparado y se ha explicado de forma cuidada.	3,9	3,5

TABLA V. ENCUESTA SEEQ: VALORACIÓN DE LAS PRÁCTICAS EN SU CONJUNTO

Cuestiones	Aprendizaje y Organización	
	SSEE 16/17	*IAS 16/17*
6. Las prácticas propuestas y el trabajo desarrollado en ellas me han parecido intelectualmente estimulante.	4,2	3,2
7. Con las prácticas he aprendido cosas útiles que me han ayudado a seguir la asignatura.	4,4	3,8
8. Lo que he aprendido en estas prácticas me será útil en otras asignaturas de la carrera.	4,2	3,0
9. Mi interés por la electrónica ha aumentado como consecuencia de las prácticas.	4,1	2,8
10. Las prácticas cubren los principales contenidos de la asignatura.	4,4	3,5
11. Los guiones de prácticas son completos, recogen los objetivos y especifican claramente la tarea que hay que desarrollar.	4,1	4,2
12. Las sesiones de prácticas están bien programadas. Su número y duración son correctos en comparación con el global de la asignatura.	3,2	3,8
13. Hay buena coordinación entre la teoría y las prácticas.	4,0	3,2
14. El empleo de una plataforma de diseño como la Nexys3 resulta estimulante y adecuada para las prácticas de la asignatura.	4,3	2,8
15. Los contenidos de las prácticas parecen asequibles.	3,9	3,8
16. La carga de trabajo es adecuada.	2,9	3,2
17. El seguimiento y apoyo del profesor en el laboratorio es suficiente para cumplir los objetivos de cada práctica.	3,7	3,5

TABLA VI. ENCUESTA SEEQ: ACTITUD Y GRADO DE SATISFACCIÓN

Cuestiones	Actitud y Grado de Satisfacción	
	SSEE 16/17	*IAS 16/17*
18. Estoy motivado con la asignatura. Sigo habitualmente las clases y las llevo al día.	4,0	3,5
19. Preparo con antelación el trabajo de cada sesión de laboratorio y resuelvo mis dudas.	3,5	3,3
20. En general estoy muy satisfecho con las prácticas de esta asignatura.	4,0	2,8
21. Comparativamente, he dedicado más esfuerzo a esta asignatura que a otras.	3,9	3,8
22. No estaba motivado con la asignatura, pero las prácticas han logrado motivarme.	3,0	2,5
23. El trabajo de prácticas ha resultado más fácil de lo que esperaba.	2,7	3,2

TABLA VII. ENCUESTA SEEQ: CARGA DE TRABAJO

Cuestiones	Carga de Trabajo	
	SSEE 16/17	*IAS 16/17*
24. Comparada con otras, esta asignatura ha sido: 1 muy difícil – 5 muy fácil.	2,7	3
25. Comparada con otras, la carga de trabajo de esta asignatura ha sido: 1 muy grande – 5 muy pequeña.	1,9	2,2

TABLA VIII. ENCUESTA SEEQ: VISIÓN GENERAL

Cuestiones	Visión General	
	SSEE 16/17	*IAS 16/17*
26. Desde un punto de vista general, esta asignatura me ha parecido …	4,0	3,3
27. Desde un punto de vista general, este profesor me ha parecido …	3,9	3,2

Interpretando las encuestas, podemos ver en la TABLA IV, cuestiones 1 y 2, que los alumnos valoran muy positivamente las asignaturas, con medias sobre el 4, y además consideran su aprendizaje como valioso. Es de destacar también que existe margen de mejora en IAS, dado que en la pregunta 3, sobre si el interés por la electrónica ha crecido en los estudiantes, la respuesta ha sido algo neutra (3 puntos), aunque puede deberse a que en el último curso ya están suficientemente motivados, siendo difícil aumentarla. En cualquier caso, contrastaremos estos resultados en los próximos cursos.

En cuanto a las prácticas, en la TABLA V destacamos en la cuestión 7 la confirmación de que su aprendizaje a través de prácticas les ha resultado útil, así como, en la cuestión 11, que valoran positivamente el hecho de crear guiones de prácticas bastante completos. Por otro lado, en la pregunta 8, indican en IAS que lo aprendido no les va a servir demasiado en otras asignaturas, si bien es lógico porque están al final de los estudios de grado. En la cuestión 9 se confirma lo visto anteriormente en la pregunta 3, por lo que habrá que motivar más a los alumnos en este último curso, si es posible. En la pregunta 12 sobre el número de sesiones, en SSEE hubo la circunstancia de la masificación en el laboratorio, con las dificultades inherentes para poder atenderlos por parte del profesorado, de ahí la baja calificación; esta circunstancia ya ha sido corregida en el presente curso, programando el centro un grupo reducido más y, por tanto, haciendo que los estudiantes se encuentren mejor atendidos. Respecto a la pregunta 14, sobre el uso de una plataforma de desarrollo común para todas las asignaturas, creemos que la baja puntuación en IAS, mientras en SSEE lo valoran bastante alto, es debido a que una parte del software utilizado dio problemas de forma recurrente, por lo que los estudiantes lo percibieron negativamente. En la TABLA VI vemos que es posible la mejora en los apartados de motivación y satisfacción de las prácticas (preguntas 20 y 22), así como que los estudiantes deben preparar con antelación las prácticas (pregunta 19).

Un hecho destacable, que se recoge en varios apartados de las encuestas, es el incremento en la carga de trabajo. En la TABLA V, pregunta 16, en la TABLA VI, pregunta 21, y toda la TABLA VII, destaca el sentir de los estudiantes por el esfuerzo que les ha supuesto realizar estos proyectos prácticos, sobre todo comparativamente con otras asignaturas, tanto en SSEE como en IAS. Este hecho debemos estudiarlo con detenimiento para poder facilitarle, en la medida de lo posible, que el desarrollo práctico de las asignaturas sea más asequible para el futuro, si bien hay que recordar que los resultados académicos han sido bastante positivos. Esperamos que, a partir del presente curso 2017/18, en el que ya prácticamente todos los matriculados en las asignaturas han cursado la nueva experiencia en todos sus niveles, la sensación de carga de

trabajo se reduzca porque estén acostumbrados a este tipo de enfoque en las asignaturas implicadas.

Consideramos que el resto de cuestiones que se valoran en las encuestas son bastante positivas, si bien intentaremos mejorar en los puntos donde todavía no se ha alcanzado una valoración suficiente. Esperamos, como se refleja en la TABLA VIII, que en la asignatura IAS podamos superar el grado de satisfacción general del presente curso 2017/18, dado que acceden los estudiantes que realizaron SSEE en el curso anterior con el método de prácticas semi-guiadas, lo que les debe facilitar el trabajo y así valorar mejor la asignatura de 4º.

V. Conclusiones

La implantación de la nueva experiencia de coordinación e integración de prácticas en las asignaturas SSEE e IAS del GIERM ha sido, a nuestro entender, moderadamente satisfactoria, cumpliendo los objetivos principales de la misma:

- Se ha organizado la parte práctica de las asignaturas en torno a prácticas semi-guiadas y proyectos, y diversos bloques funcionales utilizados han sido abordados desde la perspectiva, contenidos y nivel de conocimiento de cada una de las asignaturas.
- Se han seleccionado proyectos que constituyen puntos de encuentro entre las asignaturas, y se ha generado abundante material docente, sobre todo guiones de prácticas semi-guiadas.
- Se ha llevado al aula la propuesta de forma satisfactoria, con la problemática inicial corregida en el segundo año de implantación.
- Se han presentado resultados que muestran una mejora sustancial en los índices académicos a lo largo de dos cursos, tanto en SSEE como en IAS.
- Se ha constatado un razonable grado de satisfacción por parte de los estudiantes a través de encuestas SEEQ, valorando además el esfuerzo de realizar guiones detallados para las prácticas.

Este hecho no nos libera de la necesidad de seguir trabajando en la mejora de los puntos menos fuertes de la implantación de la experiencia, pudiéndolos resumir en:

- Mejorar la sensación de la alta carga de trabajo frente a otras asignaturas, en opinión de los estudiantes.
- Mejorar en la motivación y satisfacción de los estudiantes para que realicen una preparación previa a las sesiones de prácticas, lo que redundaría en una mayor fluidez en su desarrollo.
- Corregir los posibles fallos en el uso de la plataforma común de aprendizaje Nexys 3, para que los estudiantes la consideren más positivamente.

En el presente curso 2017/18, así como en el próximo, esperamos poder implementar las mejoras comentadas, junto con los nuevos retos planteados, como parte del desarrollo de PIE17-130, concedido en la nueva convocatoria 2017/2019.

Agradecimientos

Esta experiencia docente ha sido desarrollada y financiada dentro del marco de los proyectos “Coordinación e Integración de Prácticas de Electrónica en Asignaturas de Grado en Ingenierías”, PIE15-95 de la convocatoria 2015, y “Prácticas de Electrónica basadas en Proyectos Coordinados en Asignaturas de Grado en Ingenierías Industriales”, PIE17-130 de la convocatoria 2017, de los Proyectos de Innovación Educativa convocados por el Vicerrectorado de Personal Docente e Investigador de la Universidad de Málaga.

Referencias

[1] R. Navas-González, R. Fernández-Ramos, and A. Daza-Márquez, “Coordinación e Integración de Prácticas de Electrónica en Asignaturas de Grado en Ingeniería,” in *Actas del XII Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica*, Sevilla, 2016, pp. 321–328.

[2] H. W. Marsh, “SEEQ: A reliable, valid, and useful instrument for collecting students’ evaluations of university teaching,” *Br. J. Educ. Psychol.*, vol. 52, no. 1, pp. 77–95, Feb. 1982.

[3] “Digilent Nexys 3 Spartan-6 FPGA Trainer Board.” [Online]. Available: https://www.xilinx.com/products/boards-and-kits/1-27b7nm.html. [Accessed: 14-Apr-2018].

[4] “MicroBlaze Soft Processor Core.” [Online]. Available: https://www.xilinx.com/products/design-tools/microblaze.html. [Accessed: 16-Apr-2018].

[5] R. Navas-González, A. Daza-Márquez, R. Fernández-Ramos, and O. Oballe-Peinado, “Coordinación e Integración de Prácticas en Asignaturas de Grado en Ingeniería: Electrónica Digital y Sistemas Electrónicos,” in *Actas del XIII Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica*, Tenerife, 2018.

Experiencias de estudiantes y profesores en la realización de Trabajos Fin de Grado multidisciplinares

Julio Pastor-Mendoza
Departamento de Electrónica
Universidad de Alcalá (UAH)
Alcalá de Henares, España
julio.pastor@uah.es

Emiliano Pereira González
Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones
Universidad de Alcalá (UAH)
Alcalá de Henares, España
emiliano.pereira@uah.es

Miguel Tradacete Ágreda,
Gonzalo Rodríguez Martín,
Rodrigo Gutiérrez Moreno,
Mario Ríos Muñoz,
Sofía Barba Magdalena
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares, España

***Abstract*— Las competiciones interuniversitarias de robots son una oportunidad para motivar a estudiantes y profesores en la realización de proyectos multidisciplinares, donde la participación de personas con formación y experiencia en diferentes ramas de conocimiento mejora la obtención de competencias profesionales y transversales de todos los estudiantes involucrados. Además, esta colaboración ayuda a los profesores implicados a plantearse modificaciones en las asignaturas que imparten para buscar una mejor relación entre ellas dentro de los planes de estudio. En este trabajo se presentan las principales experiencias, tanto de los estudiantes y profesores, al llevar a cabo el diseño y construcción de un robot para participar en una competición internacional. Además, también se exponen cómo este trabajo en equipo ha permitido realizar Trabajos Fin de Grado a los estudiantes y a establecer una colaboración futura entre los profesores implicados.**

Palabras clave — Competiciones de robots, robótica, multidisciplinariedad, trabajo cooperativo, aprendizaje basado en proyectos.

I. Introducción

La robótica es una disciplina que permite desarrollar un amplio número de habilidades y competencias en estudiantes. Esto es debido en parte a que la robótica tiene un carácter multidisciplinar. A esto se debe añadir el hecho de que diseñar y construir un robot motiva a la inmensa mayoría de los estudiantes [1]. Desde hace muchos años, la robótica móvil se está trabajando en estudios universitarios de Grado dentro de asignaturas que no tienen como objetivo especializarse en robótica sino en desarrollar otras competencias o como elemento de motivación [2] y [3].

En los últimos años, con la proliferación de plataformas hardware de bajo coste y sistemas abiertos diseñados para introducir a niños y jóvenes en la tecnología [4] [5], están animando muchos centros de secundaria a incluir esta disciplina, bien como actividad extraescolar (centros de secundaria) o bien como asignaturas transversales ofertadas para estudiantes de titulaciones muy diferentes (facultades y escuelas universitarias). A modo de ejemplo, en la Comunidad de Madrid, desde hace tres años, se ha introducido una asignatura obligatoria en 1º, 2º y 3º de ESO denominada "Tecnología, programación y robótica" que también es optativa en 4º de ESO.

La participación de estudiantes en concursos de robótica es una oportunidad para afianzar y profundizar en los contenidos aprendidos en sus diferentes planes de estudio (ver por ejemplo los trabajos [6], [7] y [8]). Entre estas ventajas, pueden destacarse la mejora en las competencias científico-tecnológicas, lingüística, de aprender a aprender las habilidades y las transversales relacionadas con el trabajo en equipo y la planificación de las tareas.

Es interesante como esta disciplina está teniendo cada vez más peso en la educacsecundaria, formación profesional y bachillerato (ver por ejemplo [9]). Un ejemplo de competición donde los estudiantes de secundaria y bachillerato pueden participar es Robo Cup Junior (en [10] puede verse que la edición de 2017 se realizó en Alcalá de Henares). El impacto de esta competición en el aprendizaje de herramientas y competencias ha sido documentado en revistas especializadas en robóticas, como [11], donde se expone el impacto en el aprendizaje de habilidades en STEM (Science, Technology, Enginnering and Mathematics).

Desde el punto de vista de las titulaciones universitarias, la robótica permite profundizar en conocimientos de mecánica, control y electrónica, en el caso concreto de las titulaciones de ingeniería, y una oportunidad de desarrollar ciertos conocimientos tecnológicos, en el caso de titulaciones como magisterio, derecho, medicina, empresariales, etc. Por ejemplo, en [12] se presentan la participación en la competición IDC Robocon como una herramienta útil para la formación en ingeniería.

De la bibliografía consultada y de la experiencia personal se pueden enumerar las siguientes aportaciones que conllevan el diseño de robots y la participación en competiciones para un estudiante universitario de ingeniería [2], [3], [13] y [14].

- Análisis e Integración de Sistemas.

Debido a que un robot está formado por varios subsistemas que deben funcionar conjuntamente, con el diseño de robots se aprende a analizar cada uno por separado y sus relaciones e implicaciones con los otros. Se aprende a analizar también un sistema en diferentes niveles a nivel mecánico (algoritmos de control de bajo nivel, cinemática y dinámica del robot,…), al

nivel de decisión y estrategia y al nivel de sistema (la integración de la mecánica y la estrategia).

- Gestión de proyectos.

El diseño de un robot para participar en una competición es un claro ejemplo de un proyecto de ingeniería con una fecha concreta de finalización en la que participa un equipo de personas con un objetivo común. En el desarrollo del proyecto es imprescindible una buena gestión, no sólo de los recursos económicos y materiales, sino de las comunicaciones entre los miembros, de la gestión del tiempo, etc. También se aprende a trabajar en equipo.

- Motivación para alumnos de cursos intermedios.

En los casos en que el diseño de robots se plantea en cursos intermedios tienen la posibilidad de aprender conocimientos y técnicas que luego estudiarán en profundidad en cursos posteriores aumentando su interés y ayudando a su posterior aprendizaje.

- Análisis de soluciones y madurez intelectual.

Cuando un equipo comienza el diseño de un robot para una competición no sólo debe pensar en cómo solucionar un problema sino en cómo lo solucionarán los demás. Esto les fuerza a pensar con mucha más amplitud de miras que si se tratara de un simple proyecto de diseño. Además, en la competición pueden comprobar las diferentes soluciones utilizadas y aprender de ellas. Esto lo relaciona [14] con un aumento de la madurez intelectual de los participantes según se indica en el modelo de madurez intelectual de Perry [15].

- Experiencias personales

No hay que dejar de lado la experiencia personal que los estudiantes obtienen al trabajar en un equipo de trabajo, en viajar para asistir en una competición y compartir sus conocimientos y experiencias con personas que tienen sus mismas inquietudes. Se puede observar que los beneficios presentados no están relacionados directamente con los conocimientos técnicos específicos relacionados con la robótica (algoritmos, circuitos, etc.) sino más con habilidades más generales muy importantes en ingeniería.

Con el inicio de los nuevos grados en la Universidad de Alcalá se decidió ofertar una asignatura transversal de robótica para potenciar los conocimientos científicos y tecnológicos en todas las titulaciones. Así, la asignatura Robótica para Todos [16] se planteó para motivar a todos los estudiantes a adentrarse en el conocimiento del manejo, construcción y programación de robots con el único requisito de tener conocimientos básicos de programación en C. El objetivo es que todos los estudiantes puedan ver los aparatos tecnológicos con una visión diferente a la de un simple usuario. Al final del curso, cada estudiante debe demostrar sus conocimientos y habilidades para diseñar un robot móvil, dentro de un equipo de trabajo multidisciplinar formado personas con titulaciones diferentes, que pueda realizar ciertas tareas sencillas. Estas tareas sencillas se evalúan sometiendo el producto final a una exhibición práctica y/o a una competición con el resto de equipos formado por la clase.

Uno de los responsables de la asignatura y coautor de este trabajo tiene experiencia en organizar y participar en competiciones de robots [17]. Estas competiciones abarcan desde proyectos que pueden llevarse a cabo en unas semanas por parte de uno o dos estudiantes, hasta competiciones con objetivos complejos que requieren la participación de un equipo grande personas durante varios meses. Por ejemplo, se pueden mencionar las competiciones de Eurobot [18] y las Jornadas de Tecnología y Robótica [19]. Estos ejemplos de competiciones también son introducidos en la asignatura para animar a los estudiantes a participar en ellas y en otras organizadas en otros lugares del planeta.

Durante el curso 16/17 se pusieron en contacto con uno de los autores del presente trabajo algunos estudiantes que habían cursado la asignatura Robótica para Todos expuesta anteriormente. La novedad, respecto a otros cursos, fue que este conjunto de estudiantes procedía de titulaciones distintas. La idea que presentaron fue realizar un proyecto de robótica complejo que fuera capaz de participar en algún concurso internacional de robótica competitivo. Además, algunos de estos estudiantes estaban también interesados en realizar un Trabajo Fin de Grado (TFG) que incluyera la realización de un proyecto de robótica dentro de sus objetivos fundamentales.

Esta iniciativa ha resultado ser pionera dentro de la Universidad de Alcalá. Esto es debido a que la normativa de esta universidad no permite que los TFG's puedan realizarse en grupos. Por lo tanto, la inmensa mayoría de los TFGs realizados (desde la implantación de los nuevos grados en 2010) involucraban a un estudiante y a un profesor, sin fomentar de ninguna forma el trabajo en equipo y mucho menos el trabajo en equipo en grupos multidisciplinares que puedan implicar la participación de estudiantes y profesores de diferentes titulaciones y áreas de conocimiento.

El reto de esta iniciativa era proponer un conjunto de tareas que fueran lo suficientemente independientes para que pudieran desarrollarse de forma individual para realizar los TFG's pero que a la vez estuvieran relacionadas para que los estudiantes pudieran trabajar en equipo en la integración de las diferentes partes y en la puesta a punto de un robot para participar así en el concurso.

El presente documento intenta reflejar las experiencias de estudiantes y profesores durante los meses donde se preparó el trabajo para participar en el encuentro anual Robotic Day [20] y se realizaron los TFGs. Las personas implicadas fueron cinco estudiantes, que pertenecen a tres grados distintos (Electrónica y Automática Industrial, Ingeniería Informática y Administración y Dirección de Empresas), y dos profesores que pertenecen a diferentes áreas de conocimiento (Tecnología Electrónica y Mecánica) y departamentos.

El documento continúa con una breve descripción del concurso. En la sección III se incluye la planificación del proyecto. En la sección IV se resume los trabajos realizados y en la Sección V se termina con un resumen de las experiencias y sus principales conclusiones, destacándose los problemas encontrados por estudiantes y profesores y un análisis cualitativo de las principales experiencias, tanto positivas como negativas.

II. LA COMPETICIÓN

El grupo de estudiantes y profesores se propuso como primer objetivo participar en el concurso Eurobot. La incertidumbre

sobre si se iba a realizar o no durante el año 2017, hizo decantarse al grupo por la prueba RoadSide Assistance [21] del encuentro Robotic Day. Robotic Day es un encuentro a nivel europeo dentro del campo de la robótica, donde se celebran multitud de actividades y competiciones. Este encuentro tiene lugar en la Facultad de Matemáticas y Física de la Charles University de Praga, República Checa. El evento suele tener una duración de dos días, siendo el primero solo para participantes y el segundo además para todo el que quiera asistir como público a las competiciones.

El "Robotic Day" incluye competiciones de distintos niveles, desde robots telecontrolados por cable diseñados por niños hasta una competición de robots autónomos que tienen que interactuar con diferentes elementos del campo de, "Roadside Assistance". Esta competición simula un accidente de tráfico a pequeña escala, donde cada equipo participante debe ser capaz de crear un robot que, de forma autónoma, brinde asistencia como si de una carretera real se tratase. En cada partido se enfrentan dos equipos con un robot cada uno, los cuales compiten a ver quién obtiene más puntos.

Hay tres cometidos principales en los cuales el robot deberá demostrar sus habilidades. Ellos son: recoger y depositar unas baterías en unos coches, retirar de la carretera un camión accidentado a la vez que se recoge toda su carga que se encuentra esparcida de forma aleatoria para llevarla a otro camión, y por último colocar unas señales de advertencia. En la Figura 1 se muestra la vista superior del campo de juego que tiene unas dimensiones de 3 m de ancho por 2 metros de largo. En el perímetro del campo hay seis soportes que pueden ser utilizados por los equipos para colocar unas balizas que les ayuden en el posicionamiento autónomo de los robots.

III. PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO

En los trabajos conjuntos de varias personas existe el riesgo de que uno no realice su parte por diferentes razones. Cuando las diferentes partes se pretende que sean el Trabajo Fin de Grado de varios estudiantes, el que una persona no realice su trabajo no debe condicionar que el resto de personas no pueda completar su trabajo individual. Por lo tanto, todas las partes deben tener una funcionalidad mínima y deben integrarse adecuadamente.

El trabajo técnico, que fue llevado a cabo por los cuatro estudiantes de ingeniería, se dividió en las siguientes partes:

- Sistema de manipulación
- Sistema motriz
- Sistema de balizas y comunicación
- Sistema de estrategia de alto nivel

Las tareas de marketing, búsqueda de financiación y estudio de viabilidad económica del proyecto fueron realizadas por la estudiante de Administración y Dirección de Empresa. Aunque ella fue la cara visible del marketing, en todo momento el resto de integrantes trabajaron junto a ella realizando tareas más técnicas como la búsqueda de empresas del ámbito tecnológico que pudieran mostrar interés en el patrocinio o como la aportación de inventarios detallados del material necesario para el estudio de la viabilidad económica. De esta forma los integrantes "técnicos" aprendían métodos de marketing y la estudiante de Administración y Dirección de Empresa adquiría experiencia en el trato con empresas del sector tecnológico.

Se expuso también todo el proyecto multidisciplinar al director de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alcalá, en cuya exposición participaron todos los integrantes.



Figura 1: Visión superior del campo de juego de Roadside Assistance construido en la Universidad de Alcalá.

Para la dirección de los trabajos técnicos se juntaron profesores de dos departamentos con el objetivo de que cada uno aportara su experiencia y conocimiento. Uno de los profesores con experiencia en el diseño y programación de robots móviles y otro profesor con experiencia en el análisis y diseño de mecanismos. De esta forma, el profesor de robótica supervisaba todos los trabajos y el profesor de mecánica coordinaba todos los aspectos mecánicos de los sistemas de manipulación y motriz.

Respecto a la tarea de marketing y búsqueda de financiación, cabe destacar la dificultad para encontrar "padrinos" públicos y privados. También debe mencionarse que se realizó un proyecto previo para ayudar a conseguir apoyos económicos para la realización del robot y para tener una visión general del proyecto, proponiéndose varias alternativas económicas. El resultado de todo este trabajo fue una financiación menor de la esperada, lo que implicó un reajuste en el proyecto técnico original, que tuvo que adaptarse a las nuevas restricciones económicas.

Dentro de las modificaciones técnicas que hubo que realizar para reducir el presupuesto, cabe destacar principalmente tres relacionadas con el sistema de manipulación, el sistema motriz y la estrategia de alto nivel. El sistema de manipulación se centraba en la parte de la recogida de los cubos (representan la carga del camión accidentado). Esta tarea era la que permitía obtener mayor puntuación. Para esta tarea se iban a emplear dos brazos robóticos idénticos que iban a ir colocando todos los cubos dentro del robot de forma ordenada para poder expulsarlos todos a la vez en el otro camión cuando hubieran sido recogidos. Para ello, la plataforma móvil debía contener a los dos manipuladores junto con los cubos. Aunque se diseñaron completamente y se simularon estos manipuladores, no pudieron implementarse por ser demasiado caros para el presupuesto disponible. En su lugar, el equipó decidió diseñar unos actuadores tipo "montacargas" para coger otros elementos del campo de juego.

La plataforma móvil debería también identificar con precisión la localización de los diferentes elementos para poderlos recoger. El sistema de visión necesario para identificar la posición de las piezas integrado con el sistema de control de alto nivel requería de una plataforma hardware de más prestaciones de la que finalmente se utilizó por lo que el reconocimiento de imágenes hubo que reducirlo al mínimo.

El robot debía desplazarse con velocidad y precisión a los puntos que indicaba el nivel de estrategia para lo cual eran necesarios motores potentes con encoders incorporados. En el diseño final se utilizaron motores de muy bajo coste que hacía el movimiento más lento. En la figura 2 se muestra el robot final construido.



Figura 2: Visión del robot construido.

IV. TRABAJOS REALIZADOS

A continuación, se resumen los principales trabajos realizados.

A. Sistema de manipulación

El diseño del sistema de manipulación se propuso en el TFG titulado "Diseño de un robot autónomo: estudio cinemático y diseño mecánico de un brazo robótico de cuatro grados de libertad" realizado por un estudiante del Grado en Ingeniería en Electrónica y Automática Industrial (4º autor).

En el diseño de este brazo se definió primero el campo de trabajo del mismo y se estableció una estrategia a la hora de recoger todos los cubos (representan la carga del camión accidentado) y llevarlos al de sustitución. Estas primeras decisiones fueron tomadas por todos los integrantes del grupo de estudiantes, ya que todo el conjunto de las partes que integrarían el robot estarían interactuando entre sí y compartiendo un mismo espacio físico. Así, entre todos ellos, se consiguió definir el campo de trabajo y la estrategia de esta parte a la vez que ajustaban a medida el resto de partes, obteniendo una visión muy general del conjunto. Consecuentemente, estas decisiones son las que permitieron definir la estructura del brazo (tipo de articulaciones, longitudes de eslabones y tipo de efector final entre otras cosas). La decisión fue optar por un brazo con una articulación lineal para el desplazamiento vertical, dos articulaciones rotacionales para el posicionamiento horizontal, y una tercera rotacional para la orientación en torno al eje vertical, resultando ser la típica estructura de un robot SCARA. Como efector final se eligió una ventosa. El siguiente trabajo fue el análisis cinemático de la estructura planteada a partir de la aplicación de Denavit-Hartenberg [22]. Con ello se obtuvieron las ecuaciones de la cinemática directa e inversa y se procedió al diseño de las trayectorias del brazo para establecer qué velocidades y aceleraciones eran necesarias.

En todo momento este análisis Denavit-Hartenberg [22] fue supervisado por otros dos miembros del grupo estudiantes en Ingeniería Electrónica y Automática Industrial y discutido junto con el autor de esta parte, reajustando parámetros ya que, como se exponía anteriormente, el resto de partes dependían de esos parámetros.

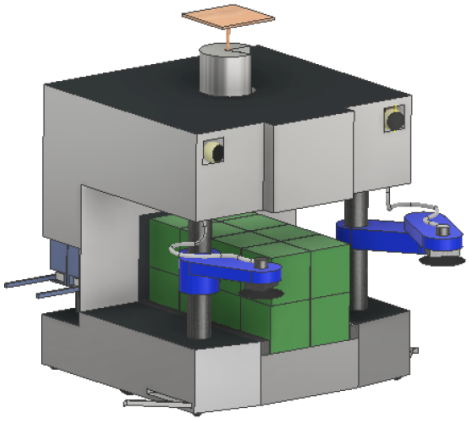


Figura 3: Esquema del robot diseñado.

Para las trayectorias se eligió las de tipo trapezoidal, es decir, con una fase inicial de aceleración positiva, otra con aceleración nula y velocidad constante, y finalmente una tercera fase de aceleración negativa hasta detenerse. Otro aspecto importante es que se ha llevado a cabo mediante interpolación articular, pero teniendo en cuenta las posiciones límite articulares que provocarían que el extremo del brazo colisionase con algún obstáculo.

Después de establecer las trayectorias, mediante una elección de tiempos en función de la estrategia global del equipo a la hora de abordar la prueba completa, se establecieron las velocidades y aceleraciones más acordes para las articulaciones. Para ello se emplearon simulaciones en Matlab variando las aceleraciones y velocidades de las articulaciones hasta llegar a un resultado competitivo en términos de tiempo de trayectorias.

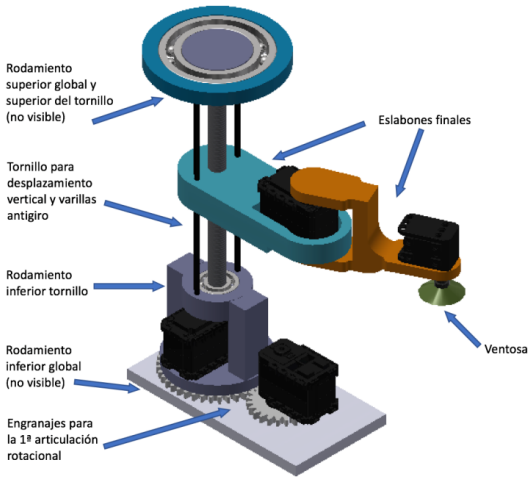


Figura 4: Estructura detallada del manipulador.

Una vez finalizado en el análisis cinemático, se realizó un análisis de la resistencia de los componentes del robot. Para ello se analizaron las secciones más problemáticas desde el punto de vista de resistencia de materiales. Luego se comprobó si los materiales y secciones elegidas eran las adecuadas, estudiándose las situaciones más críticas que demandarían el máximo par a los actuadores mediante algunas suposiciones y sobredimensionamientos. Con estos datos y los de velocidad se eligieron modelos comerciales para los actuadores más adecuados.

Aunque el diseño se completó con éxito y se demostró, de forma analítica, su viabilidad, las restricciones económicas hicieron inviable la construcción y montaje de los dos manipuladores dentro del sistema motriz. En su lugar, se diseñaron y construyeron dos manipuladores al estilo de pequeños montacargas o toro mecánico industrial para coger otros elementos del campo de juego.

El dimensionado de estos montacargas y el sistema principal de su elevación fue planificado y diseñado por todos los estudiantes del grupo, ya que como su construcción no se planificó en un inicio hubo que reestructurar sobre todo la parte del sistema motriz por temas de espacio y encajar así ambas. La mecánica interna más específica corrió a cargo del autor del sistema de manipulación.

B. Sistema motriz

El diseño del sistema motriz fue propuesto en el TFG "Diseño de un robot autónomo: plataforma base y control del movimiento". Este TFG fue realizado por un estudiante del Grado en Ingeniería en Electrónica y Automática Industrial (3er autor).

En este trabajo se afrontó la parte de la plataforma base y el control del movimiento del robot por el campo de juego. Se contempló el diseño y construcción de la parte motriz y todo el software de control que ello conllevaba. La finalidad del proyecto fue crear una estructura robusta, versátil en cuanto al control de los movimientos y de carácter modular que permitiera al resto de compañeros desarrollar el resto del robot en paralelo, lo que directamente implicaba a todo el grupo en la planificación de la distribución de los elementos motrices (motores, baterías, …) en la parte baja del robot. Para el análisis teórico de los aspectos cinemáticos y mecánicos del robot y el dimensionamiento de los motores se basó en Trabajos Fin de Carrera de estudiantes que participaron en la competición internacional Eurobot en diferentes ediciones [23] y [24]

Este trabajo se dividió en 3 bloques principales: diseño mecánico, diseño electrónico y diseño software. En el primer bloque del diseño mecánico se describieron los cálculos de los parámetros dinámicos del robot, de la elección de los motores y del diseño de todos los elementos mecánicos del proyecto. Especialmente se analizaron la aceleración máxima que debe alcanzar el robot, la potencia requerida por los motores y todo el diseño de los elementos mecánicos y estructurales. Para este análisis fue necesaria una planificación grupal de cada parte, para conocer el peso y distribución aproximado de todos los elementos de las distintas partes de todo el robot. Destacar que en un principio se diseñaron unos encoders propios con piezas impresas en 3D (figura 5), aunque finalmente se sustituyeron por encoders comerciales ya que era necesario aumentar las prestaciones del control del movimiento.

Todas las piezas de los encoder inicialmente construidos mediante impresión 3D fueron diseñadas por el autor del sistema motriz, pero su construcción fue llevada a cabo también por otros dos integrantes más. Así se pudo paralelizar el diseño con la impresión 3D, ya que para calibrar las tolerancias se requiere una inversión considerable de tiempo imprimiendo piezas prototipo.

La arquitectura hardware se realizó utilizando como centro de control la tarjeta Mini-DK2/LPC1768 basada en el microcontrolador LPC1768, Cortex-M3 de ARM estudiado a lo largo de la carrera en dos asignaturas, hecho que ayudó a la colaboración del resto de estudiantes de esta misma carrera a supervisar la programación y optimización de la tarjeta. La CPU de esta tarjeta trabaja a 100 MHz y sus periféricos a 25MHz, suficiente velocidad para el correcto funcionamiento de este proyecto.

A la tarjeta de control se le añadió un puente en H basado en los circuitos integrados basa en los integrados VNH2SP30 con capacidad de entregar hasta 30A a cada motor, una electrónica de acondicionamiento de la señal de los encoders y unas tarjetas de distribución de las señales de alimentación. También tenía conectados diversos sensores de distancia situados en el perímetro del robot utilizados para detectar a los robots oponentes y evitar colisiones. En la figura 6 puede observarse el diagrama de bloques del sistema diseñado.

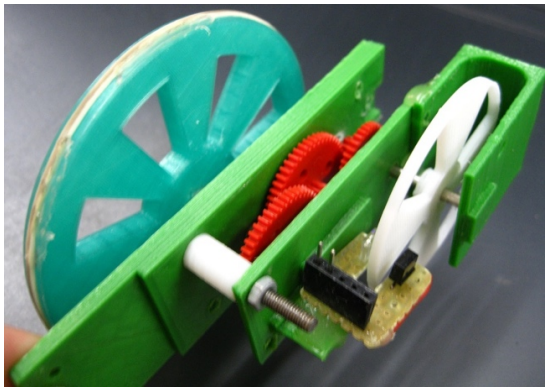


Figura 5: Encoder diseñado con piezas de impresión 3D

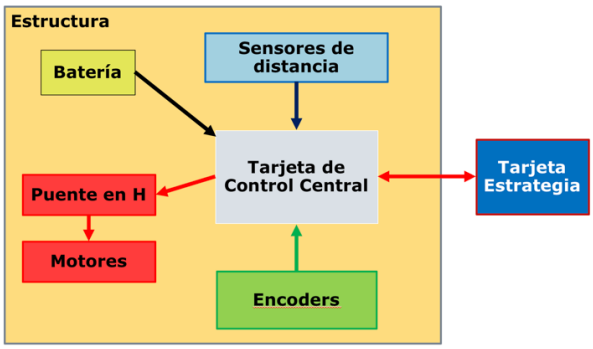


Figura 6: Esquema de conexionado del sistema

En el diseño software, y tercer bloque principal de este trabajo, se describió todo el diseño a nivel software del proyecto,

el diseño y simulación del sistema de control y las diferentes consideraciones tenidas en cuenta en su implementación en la tarjeta de control.

Se diseñaron dos controladores Proporcinal Integral (PI) para los motores comprobando su funcionamiento en simulación con Matlab y posteriormente en el sistema real. Unas inestabilidades del eje de los motores hacían inviable el uso de una componente derivativa en el controlador.

Aunque el diseño de los controladores corrió a cargo del autor de esta parte, el ajuste de los mismos fue realizado a partes iguales entre otro de los integrantes del grupo y el autor del sistema motriz. Esto así porque en el ajuste de un controlador para motores eléctricos es fácil perder la "orientación", obteniendo peores resultados que los originales. Así pues dos puntos de vista distintos aportaban más que el doble a este objetivo.

Finalmente se describió la lógica de comunicación con la tarjeta de estrategia y la odometría desarrollada para el cálculo de la posición del robot en el campo de juego. La comunicación fue diseñada a partes iguales entre el estudiante de Ingeniería Informática y el autor de esta parte, ya que la comunicación a realizar era entre esta parte y la tarjeta de la estrategia (desarrollada por el otro estudiante). Es por ello que era necesario una colaboración directa y desarrollar conjuntamente un protocolo propio de comunicación para la transmisión de datos. También, aunque la odometría fue diseñada por el autor de esta parte, su implementación tuvo lugar en la tarjeta de estrategia, por lo que el otro estudiante tuvo que comprender la lógica de la odometría. Al mismo tiempo el autor de esta parte tuvo que ser capaz de abstraerse al nivel de la programación del ingeniero informático para poder adaptar el diseño de la odometría.

C. Sistema de balizas y comunicación

El diseño del sistema de balizas y comunicación se propuso en el TFG "Diseño de un robot autónomo. Posicionamiento por balizas y comunicación interna del robot". Este TFG fue realizado por el un estudiante del Grado en Ingeniería en Electrónica y Automática Industrial (5º autor).

Este proyecto tenía como objetivo dotar al robot de un sistema que complementara la información de la odometría para conocer con más precisión la posición del robot. También tenía el objetivo de diseñar un bus de comunicaciones que interconectara los diferentes sistemas en el interior del robot.

Se desarrollaron dos sistemas de comunicación válidos para implementar en un robot: BUS CAN, que es robusto y rápido; y UART (comunicación serie asíncrona), que es sencillo y funcional. Los dos sistemas se implementaron físicamente, pero la opción utilizada finalmente en la competición fue la de UART, realizando varias comunicaciones serie punto a punto sobre USB entre la tarjeta de estrategia y el resto tarjetas hardware. En la comunicación BUS CAN se utilizaron librerías RL_ARM de Keil, ejecutadas sobre un sistema operativo de tiempo real. Debido a problemas de tiempo para tener el robot funcional para la competición y a dificultades a la hora de integrarlas en la tarjeta de estrategia, se optó por utilizar las comunicaciones serie.

Igual que se exponía anteriormente, el protocolo de comunicación a más alto nivel de los dos sistemas debía diseñarse por todos los que fueran a hacer uso de él. Así, fue diseñado por los tres estudiantes de Ingeniería en Electrónica y Automática Industrial, siendo el autor de esta parte el encargado de la realización del mismo. En todo momento fue supervisado por sus compañeros ya que según evolucionaba el proyecto conjunto se decidió cambiar el tipo de comunicación (del BUS CAN a UART).

En lo respectivo al sistema de balizado, cabe destacar que se dividió en dos partes: posicionamiento del robot dentro del campo y posicionamiento del robot oponente. Para posicionar el robot dentro del campo se utilizaron conjuntos de leds infrarrojos situados en balizas estáticas que emitían pulsos modulados en distintas frecuencias (una frecuencia para cada baliza), recibidos en el robot por un fototransistor situado en una parte móvil que giraba constantemente de modo que en cada vuelta detectaba la posición de las tres balizas. Por medio de un algoritmo que calculaba distancias a partir de los ángulos entre las balizas detectados y utilizando el método de trilateración se calculaban las coordenadas del robot.

Posicionar el robot del oponente era una tarea prioritaria en la competición ya que, en caso de colisión, el robot causante podía ser expulsado de la competición. Para ello se utilizó un sensor situado en la parte superior del robot, que enviaba un haz de luz infrarroja mientras giraba y una baliza pasiva catadióptrica situada en el robot oponente. Cuando el haz de luz del sensor estaba apuntando a la baliza se reflejaba, siendo así detectado el robot oponente. Conociendo el diámetro de la baliza y midiendo el ancho del pulso recibido se calculaba la distancia de la misma. Conociendo la distancia y el ángulo de giro en el momento de la detección se determinaba la posición del oponente. Ambos sensores eran movidos por un motor paso a paso y estaban conectados a una tarjeta Mini-DK2/LPC1768 similar a la utilizada en el sistema de tracción.

El sistema completo incorporado al robot estaba formado por la tarjeta de control; los sensores que giraban con el motor y estaban unidos a éste con piezas impresas en 3D; la fuente de alimentación de la tarjeta con sus baterías; y el controlador del motor paso a paso.

Al igual que en las partes anteriores, las piezas 3D fueron diseñadas por el autor de esta parte, pero impresas tanto por él como por el resto de integrantes, facilitando el trabajo en paralelo del diseño de más piezas. También la estructura que sustenta el sistema de balizado fue diseñado y fabricado por otro integrante del grupo, ya que se hizo pocos días antes de la competición y se requería de una aportación directa dentro de esta parte.

En la figura 7, se muestra un diagrama de bloques que representa las partes que forman el sistema y las conexiones entre ellas. Las entradas y salidas señaladas en los diferentes bloques se corresponder con los elementos seleccionados para la realización del proyecto. Como sensor de las balizas activas se utiliza un sensor TSOP4838; para la detección del oponente se utiliza un sensor de luz difusa 42JS-PNP; como tarjeta para realizar el control de todo el sistema se utiliza una mini-dk2; el motor seleccionado es un NEMA-17 y su controlador un A4988.

Se muestra el sistema completo con todos sus elementos en la figura 8.

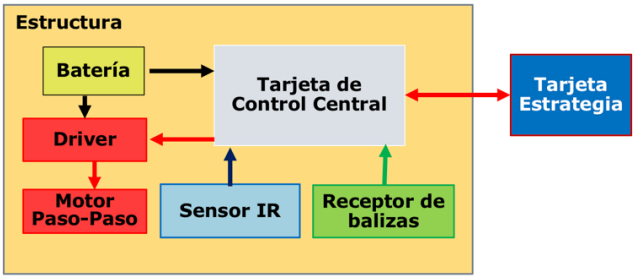


Figura 7: Esquema de conexionado del sistema

D. Sistema de estrategia de alto nivel

El diseño del sistema de estrategia de alto nivel ha sido realizado por un estudiante del Grado de Ingeniería Informática (6º autor). Este estudiante ya estaba haciendo un TFG en otra área y el trabajo lo hacía por interés personal.

La tarea que se realizó fue implementar ROS (Robotics Operating System) en una tarjeta Raspberry Pi sobre Linux comunicándose por una comunicación serie asíncrona sobre USB con las otras tarjetas. ROS dispone de funciones de alto nivel de control de robots y proporciona drivers de comunicación con multitud de plataformas robóticas estándar. El estudiante se hizo cargo de la estrategia y diseñó el driver necesario para que las tareas de alto nivel pudieran comunicarse con el hardware diseñado. En todo momento estuvo trabajando con cada uno de los integrantes del grupo, ya que para realizar la comunicación con cada uno de ellos debía diseñar juntos los protocolos de comunicación y en muchas ocasiones transcribir programas software de otros entornos distintos a ROS, como ya se exponía en el *Sistema motriz*. Esto hizo tener al autor de esta parte una visión general hardware de todo el robot, hecho muy útil ya que era él el encargado de la estrategia y debía conocer las capacidades del robot (tiempos de descarga de la batería en función del uso de los motores, tiempos de respuesta y parámetros físicos del sistema motriz, tiempos y área de trabajo del *Sistema de manipulación,* tiempos mínimos de detección del oponente mediante el balizado,…).

Uno de los problemas que se tuvo fue que todas las pruebas las realizaron utilizando un ordenador portátil. Al pasar todo el código a la Raspberry Pi hubo problemas de integración entre el Linux de la Raspberry Pi y el de ROS.

Después de varios meses de trabajo se obtuvo un robot que pudo participar en la competición. Este robot era capaz de moverse correctamente siguiendo las órdenes del sistema de estrategia, deteniéndose en caso de encontrar oponentes. Los oponentes se detectaban tanto por los sensores de distancia perimetral como por el sensor situado en la parte superior del robot. Aunque con el sistema de balizas se podía situar al robot en el campo, no se pudo integrar esta información con el posicionamiento por odometría por lo que en la competición se utilizó sólo la odometría para localizar el robot. Como se ha dicho anteriormente, el robot que participó incluía los actuadores tipo "montacargas" para recoger algunos elementos del campo de juego

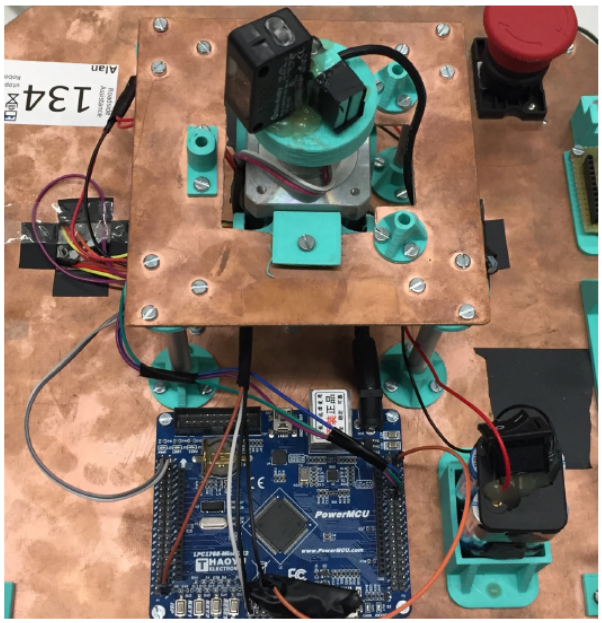


Figura 8: Montaje completo del sistema de posicionamiento.

V. ANÁLISIS DE LA EXPERIENCIA. CONCLUSIONES

Una de las grandes enseñanzas que se sacan con este tipo de proyectos es la importancia de tener una visión global, donde lo importante es que el sistema funcione correctamente. Para ello, las partes que lo forman tienen que funcionar, al menos con una funcionalidad mínima, pero de nada sirve que una parte esté completamente desarrollada con una calidad excelente si otras partes necesarias no funcionan.

También se evidencia la necesidad de tener en cuenta que en la integración de los diferentes sistemas pueden aparecer problemas que pueden condicionar el funcionamiento del sistema.

A nivel de formación docente, los estudiantes del Grado en Ingeniería Electrónica y Automática Industrial pudieron comprobar la importancia de materias como Matemáticas (Calculo I y II, Algebra y Ecuaciones Diferenciales), Mecánica (Sistemas Mecánicos y Resistencia de Materiales), Electrónica (Electrónica Analógica y Digital, Tecnología Electrónica, Electrónica de Potencia, Instrumentación Electrónica y Sistemas Electrónicos Digitales), Control (Ingeniería de Control I y II e Ingeniería de Control Electrónico) y Sistemas Robotizados. En muchos casos, el TFG supuso una oportunidad para ampliar los contenidos ya dados y para afianzar otros, que bien por la distancia entre asignaturas (algunas están en primero y otras en último curso).

También, los estudiantes tuvieron la oportunidad de afianzar y/o aprender herramientas software nuevas. Por ejemplo, muchos de ellos incrementaron el dominio de Matlab para el diseño de robots. Otros tuvieron la oportunidad de emplear software para analizar y simular mecanismos, como Autodesk Inventor, el cual es una herramienta de diseño y fabricación de piezas, las cuales pueden ser construidas en el propio laboratorio con el uso de las impresoras 3D de la facultad.

Los participantes en esta experiencia coinciden en que es necesaria una mayor integración de contenido práctico en algunas asignaturas del grado, en algunos casos a través de un proyecto que sirva para unir varias asignaturas a la vez, reduciendo así la carga de trabajo global, pero acercando a los estudiantes a una situación de diseño más realista y educativa. Esto ayudaría a afianzar conceptos de una forma más satisfactoria e incrementaría la motivación de los estudiantes.

A nivel de trabajo en equipo, los integrantes han experimentado lo que supone embarcarse en un proyecto conjunto; un proyecto con un objetivo final y un equipo para cumplirlo. Sin restar importancia al ámbito técnico, el aspecto humano ha primado desde inicio a fin, siendo un factor clave en el éxito y en el aprendizaje de lo que significa un proyecto real.

Los participantes del trabajo se han enfrentado a la realidad de tener que organizar su propio trabajo y el del resto del equipo. En un principio el equipo dividió el trabajo por partes, surgiendo así este proyecto. Esta idea inicialmente funcionó muy bien, pero según todo el proyecto del robot avanzó, esa idea necesitaba de flexibilidad. Al plantearse cada parte del robot como un TFG por separado hubo momentos en los que miembros del equipo no tenían carga de trabajo, mientras que otros la tenían en exceso. Hacia el final de todo el proyecto conjunto este hecho cambió, y la implicación directa de todos en todas las partes ayudó a acelerar considerablemente la construcción del robot.

También hay que destacar que a algunos componentes del equipo tuvieron que dedicar mucho tiempo al cálculo teórico de distintas partes del proyecto, dejando a un lado la creación de prototipos y las pruebas en general. Esto provocó que a largo plazo el proyecto conjunto se frenara, ya que es más importante la creación de prototipos intermedios funcionales que el cálculo de parámetros finales. Muchos de esos cálculos no fueron usados a lo largo del proyecto, comprendiéndose que primero ha de tenerse una idea aproximada del proyecto (prototipos) y después afinarla para un resultado final (cálculos y construcción precisa).

Los dos principales consejos dados por los estudiantes para futuros proyectos son la importancia de formar un equipo multidisciplinar que cubra varias áreas de la ingeniería y que no pierdan el tiempo construyendo algo desde cero cuando ya existe en el mercado, dado que al final va a resultar más barato, fiable y preciso. Un ejemplo de ello fueron los encoders de la plataforma móvil.

Como valoración crítica, los estudiantes piensan que se puedo mejorar el resultado si los problemas se hubieran abordado de forma más sencilla. En un principio se aspiró a construir un robot demasiado complejo para los conocimientos que se tenían en esos momentos, por lo que se perdió mucho tiempo y energías. También en el aspecto económico el esfuerzo realizado para conseguir financiación, elaborando presupuestos y buscando sponsors, sumando a la espera respuestas hicieron perder también mucho tiempo.

Como conclusión para los estudiantes, este proyecto ha servido para afianzar el conocimiento adquirido durante los años de estudio en la universidad y para adentrarse en el mundo real, dando una visión muy necesaria del entorno laboral futuro, donde la forma de trabajar es en equipo. También este trabajo intenta hacer de guía y base para futuros ingenieros y sus proyectos en el ámbito de la robótica. Para que puedan aprender tanto de los éxitos como de los fracasos en el recorrido de este proyecto, pudiendo plantear los suyos propios de una forma más organizada y eficiente.

Desde el punto de vista de los profesores implicados, esta experiencia les ha permitido conocer mejor el funcionamiento interno de cada uno de los departamentos y de la Escuela Politécnica Superior donde imparten la mayor parte de su docencia. Este conocimiento les será útil para involucrar a más profesores de otras asignaturas en proyectos futuros. Este hecho tiene dos consecuencias positivas. La primera es que, a mayor número de docentes implicados, mayor será la capacidad de enseñanza a los futuros estudiantes que se involucren en proyectos de envergadura. Esta relación entre profesores de diferentes áreas también puede ayudar a reorientar algunos contenidos de las asignaturas, para hacerlas más prácticas y relacionarlas entre ellas. Esto las hará más atractivas y reducirá la carga de trabajo de los estudiantes. Además, la implicación de un número mayor de profesores facilitará la captación de fondos docentes de los departamentos, de la escuela y de la universidad.

Para terminar, en la Tabla I se enumeran algunos índices para cuantificar el grado de satisfacción de la experiencia. Para ello se recoge la puntuación dada por los cinco integrantes del equipo. La calificación es de 1 a 10, donde 10 es muy favorable 1 es no favorable

TABLA I. VALORACIÓN DE LA EXPERIENCIA

Cuestión	***Valoración***
¿Recomendarías la participación en concursos de robótica a estudiantes de la UAH?	8
¿Te parece adecuado que los TFGs se propongan como parte de un proyecto mayor, permitiendo así la relación entre estudiantes de titulaciones diferentes?	8
¿La participación en este proyecto te ha permitido aprender conocimientos nuevos?	9
¿Cómo valorarías el apoyo institucional a este tipo de iniciativas?	4
¿Es necesario reorientar los contenidos de las asignaturas impartidas para fomentar las competencias transversales?	10
¿Es necesario reorientar los contenidos de las asignaturas impartidas para reducir la carga de trabajo y hacerlas más prácticas?	10

AGRADECIMIENTOS

El trabajo realizado y su presentación en Congreso TAEE ha sido posible gracias al apoyo del Departamento de Electrónica y del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones al proporcionar algo de material y ceder un laboratorio donde poder trabajar. También se agradece a la empresa Electrónica Alcalá por donar los componentes electrónicos utilizados.

REFERENCIAS

[1] J. Ruiz-del-Solar. "Robotics-Centered Outreach Activities: An Integrated Approach," ToE 2010 vol. 53, no. 1, pp. 38-45, Feb 2010. 2010.

[2] D.J. Mehrl, M.E. Parten, D.L. Vines Robots Enhance Engineering Education 1997 Frontiers in Education Conference Proceedings. Pág 613. 1997.

[3] Messom, C.H., Carnegie, D., Xu, P., Demidenko, S., Bailey, D., 'Robotic Competitions: Motivation for Engineering Programmes', Proceedings of

the Ninth New Zealand Electronics Conference, Dunedin, New Zealand, 2002, pp 55-60, ISBN: 0-473-09117-8.

[4] https://scratch.mit.edu (Última vez consultada 2/03/2018).

[5]]https://www.arduino.cc (Última vez consultada 2/03/2018).

[6] R.R. Murphy. "'Competing' for a robotics education," Robotics & Automation Magazine, IEEE vol. 8, pp. 44-55, 2001.

[7] J. Pastor Mendoza y F.J. Rodríguez Sánchez. "Work in Progress: Robot Contest as an element of motivation and professional improvement in students," Proceedings of 36th Frontiers in Education Conference, San Diego - California (USA), 2006.

[8] J. Pastor, I. González y F.J. Rodríguez. "Participation in international robot competitions as a way of potentiating basic professional abilities,"Eurobot International Conference on Research and Education in Robotics, Heidelberg, Germany, 2008.

[9] S. Villanueva-Rosa. "Competición intercentros: Propuesta de un marco de acción para el aprendizaje de robótica y tecnología por medio de ABP". Trabaja fin de máster (Formación del profesorado de educación secundaria, obligatoria y formación profesional). Curso 16/17.

[10] http://www.robocupjuniorspain.es/robocup-junior-spain-2017/ (Última vez consultada 2/03/2018).

[11] E. Amy. "RoboCupJunior for promoting STEM education, 21st century skills, and technological advancement through robotics competition", vol. 75, pp. 692-699 –Subdivisión B, 2016

[12] T. Ning, M. Rajesh, F. Shaohuiet ál. "IDC Robocon: A Transnational Teaming Competition for Project-Based Design Education in Undergraduate Robotics", Robotics vol. 5 (3), 2016.

[13] R.R. Murphy, 'Competing' for a Robotics Education IEEE Robotics & Automation Magazine. (2001).

[14] M. Asada, R. D'Andrea, A. Birk, H. Gitano, M. Veloso. Robotics in Edutainment. 2000 IEEE Internacional Conference on Robotics & Automation Proceedings. pp. 795-800. 2000.

[15] G. P. Brooks. Perry: Fact, Fiction and Outcomes Assessment. Annual Meeting of the Mid-Western Educational Research Association (Chicago IL, October 1998)

[16] https://portal.uah.es/portal/page/portal/epd2_asignaturas/asig100008/informacion_academica(Última vez consultada 2/03/2018).

[17] http://asimov.depeca.uah.es/robotica/(Última vez consultada 2/03/2018).

[18] http://asimov.depeca.uah.es/robotica/mod/resource/view.php?id=1452(Última vez consultada 2/03/2018).

[19] http://asimov.depeca.uah.es/robotica/course/view.php?id=69(Última vez consultada 2/03/2018).

[20] http://roboticday.org/ (Última vez consultada 2/03/2018).

[21] http://roboticday.org/2018/rules/2018-Roadside_Assistance-ENv1.pdf(Última vez consultada 2/03/2018).

[22] A. Barrientos, L. F. Peñín, C. Balaguer, y R. Aracil. "Fundamentos de Robótica". McGraw-Hill. 1997.

[23] R.Salazar-Arcucci, M. Caponata. "Un robot que juega al golf: control del movimiento. Trabajo Final de Carrera de Ingeniería Técnica Industrial de la Universidad de Alcalá. 2006

[24] J. Baliñas-Santos, Javier. "Manual de referencia para el desarrollo de robots de Eurobot". Trabajo Fin de Carrera de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Alcalá. 2016.

Aprendizaje Basado en Problemas Orientado a Proyectos para la adquisición de competencias vinculadas a los controladores industriales

Carlos Efrén Mora Luis
Javier Machado Toledo
Escuela Politécnica
Superior de Ingeniería
Universidad de La Laguna
Email: carmora@ull.edu.es,
jmachado@ull.edu.es

Peña Fabiani-Bendicho
Jorge Martín-Gutiérrez
Sara González-Pérez
Escuela Superior de
Ingeniería y Tecnología
Universidad de La Laguna
Email: pfabiani@ull.edu.es,
jmargu@ull.edu.es,
sgonzal@ull.edu.es

***Abstract*—Con el objetivo de mejorar las habilidades de cada estudiante en el análisis e interpretación de la información a la hora de resolver un problema en el ámbito del control industrial, se introducen estrategias de aprendizaje activo en una asignatura. Estas estrategias consisten en trabajar los conocimientos a través de seminarios impartidos por los propios estudiantes, como en la resolución de un problema técnico real a través de un proyecto. Esta estrategia de aprendizaje requiere un soporte y una monitorización constante por parte del profesorado, así como un modelo de evaluación basado en el nivel de habilidades adquiridas por cada estudiante.**

I. Introducción

Las estrategias y los métodos de evaluación en las universidades europeas han sufrido cambios importantes durante los últimos 15 años en las carreras de ingeniería debido, principalmente, al enfoque del aprendizaje basado en competencias introducido en la Declaración de Bolonia [1]. Por este motivo, la estrategia de evaluación continua ya aparece en los reglamentos de las universidades españolas como el método de evaluación preferente, si bien el concepto de evaluación formativa no siempre aparece vinculado a dicha evaluación continua. Esto se relaciona, de alguna forma, con el hecho de que se sigue confundiendo el concepto de evaluar con el acto de calificar [2].

A. Aprendizaje, evaluación y motivación en los estudios de ingeniería

En los aprendizajes relacionados con la Ingeniería de Control se manejan conceptos matemáticos abstractos que son difíciles de visualizar y entender por parte de los estudiantes. Sin embargo, estos conocimientos teóricos son necesarios a la hora de implementar, operar o mantener un sistema de control, independientemente de su aplicación. Tradicionalmente, al igual que en otros campos de la ingeniería, este problema se ha resuelto dividiendo las asignaturas en dos partes: *conocimientos teóricos* y *prácticas*, algo que aún se sigue aplicando, incluso en el caso de grados adaptados al Espacio Europeo de Educación Superior (EEES). Esto provoca que una parte del aprendizaje –el que se basa en la adquisición de conocimientos– sigue empleando estrategias conductuales que se basan fundamentalmente en la evaluación sumativa, relegando a un segundo plano el papel formativo de la evaluación continua. El énfasis en la evaluación sumativa promueve que los conocimientos tienden a adquirirse mediante un proceso de aprendizaje mecánico [3], lo cual compromete la aplicabilidad de estos conocimientos en un entorno práctico, como puede ser el desarrollo y la ejecución de un proyecto.

Es común que, cuando el o la docente planea la evaluación continua de los conocimientos en sus asignaturas, lo hace reintroduciendo el modelo de calificación por parciales, en el que los estudiantes pueden ser calificados poco a poco a lo largo de varios exámenes, en vez de en un único examen al final del periodo lectivo. Sin embargo, es muy probable que la única motivación existente bajo este modelo, desde el punto de vista de sus estudiantes, sea el simple hecho de dividir el esfuerzo en varias partes, lo que no necesariamente está alineado con un aumento de la motivación por aprender. Si se observa este proceso desde la perspectiva de la evaluación formativa, los exámenes y la defensa de los trabajos están enfocados casi exclusivamente como herramientas de calificación. El efecto, desde el punto de vista del estudiante, se corresponde con una motivación externa, esto es, de un reconocimiento o un castigo en función de la calificación obtenida [4], la cual no debe confundirse con una motivación genuina por aprender. Visto de este modo el examen, como herramienta de calificación, pierde prácticamente todo su potencial como oportunidad de aprendizaje. Incluso desde un enfoque meramente conductual, el efecto esperado por el profesorado tiende a ser el contrario que el deseado, dado que lo que se consigue es un almacenamiento memorístico a corto plazo, en vez de una consolidación de los conocimientos que se pretenden transmitir.

Por lo tanto, si lo que se busca es un proceso de aprendizaje en el que los estudiantes tengan un verdadero interés por

aprender, es necesario conseguir que interioricen el beneficio personal que les supone el esfuerzo necesario para lograr sus objetivos. Esta motivación puede reforzarse cuando, llegado el caso, tengan cierta sensación de éxito al ser capaces de ir cumpliendo con sus metas durante el proceso de aprendizaje [5].

B. Aprendizaje vinculado a los problemas reales

Si se separan los conocimientos de la realidad se tiende a una desconexión de los problemas reales. Si bien desde un enfoque exclusivamente cognitivo, se tiende a descontextualizar los conocimientos, de forma que estos puedan usarse en cualquier problema, el aprendizaje y el desarrollo profesional se están socializando cada vez más, y se ven fuertemente influenciados por el entorno en el que estos aprendizajes se desarrollan [6].

La capacidad de resolver problemas es una de las competencias propias de las ingenierías, la cual debe conjugarse con otras habilidades y competencias propias del perfil técnico y profesional que se trate. Una de las estrategias emergentes para conjugar los conocimientos y habilidades necesarios para confrontar este tipo de dificultades desde el diseño del currículo es el Aprendizaje Basado en Problemas Orientado a Proyectos [7]. Sin embargo, el simple hecho de enfrentar a los estudiantes a un problema técnico real, no suele ser una fuente de motivación continua a lo largo de todo el proceso: si bien es cierto que existe un pico de motivación inicial vinculado a las expectativas que se generan al entrar en contacto con el problema la primera vez, ésta decae rápidamente al tener que enfrentarse a las primeras dificultades, especialmente cuando no se dispone de conocimientos ni de habilidades previas relacionadas con dicho problema. Por este motivo, la estrategia educativa debe tener en cuenta los aspectos motivacionales y las habilidades transversales necesarias, además de los conocimientos necesarios que, en todo caso, deben vincularse al problema.

En el uso de estos modelos de aprendizaje, el problema debe ser abierto, desestructurado, y permitir múltiples soluciones, las cuales no han de estar previstas de antemano. El papel del docente no es “enseñar la solución”, sino “guiar para encontrar una solución”. Es importante, especialmente en los niveles inferiores, prestar un especial énfasis al proceso de aprendizaje, más que al producto final. La evaluación final debe, por tanto, estar basada en la capacidad de entender a diferentes profundidades, tanto el producto como el proceso seguido para su desarrollo, independientemente de la eficacia de la solución adoptada. La cuestión no es si el desarrollo soluciona o no soluciona el problema inicial, sino por qué lo soluciona, o por qué no lo consigue. Por lo tanto, el proceso de evaluación debe tener un enfoque formativo, vinculado a procesos de reflexión que hagan que cada estudiante, en función de sus propias habilidades, piense y llegue a sus propias conclusiones a lo largo de su proceso de aprendizaje. En definitiva, se trata de ser capaz de evaluar la calidad del aprendizaje cuando éste se logra en un entorno complejo y real.

C. El enfoque desde la Ingeniería de Control

Conseguir que los estudiantes se motiven, que consoliden sus conocimientos, que sean capaces de entender los procesos y su interacción con sus parámetros y variables, y que puedan elaborar estrategias para controlarlos, requiere ser consciente de cómo aprenden y qué afecta a su motivación por aprender. Pero, además, es necesario tener en cuenta aspectos transversales a la ingeniería de control, que son necesarios cuando su aprendizaje se construye con una perspectiva constructivista. Habilidades de proceso como la comunicación, la gestión de los conflictos, el trabajo en equipo y la resolución de problemas, y habilidades transversales vinculadas al desarrollo de algoritmos y software, o aquellas relacionadas con la mecánica y la electrónica, entran todas en juego cuando se emplean estrategias de aprendizaje activo mediante el desarrollo de proyectos. El o la docente debe ser capaz de manejar las herramientas más apropiadas en cada caso para dirigir a sus estudiantes por el mejor camino para lograr que sus aprendizajes se alineen con los resultados del aprendizaje planteados en un inicio.

Esto hace que la planificación del proceso de aprendizaje y sus estrategias evaluativas sean más complejas que en procesos tradicionales, especialmente con estudiantes que se aproximan por primera vez a problemas reales relacionados con la ingeniería de control. En este artículo se describe el proceso seguido con un grupo de estudiantes de grado, que fue diseñado para tratar de adecuar sus aprendizajes a los conocimientos y competencias, asociados a su futura práctica profesional, desde una perspectiva activa y social del aprendizaje.

II. Fundamentos teóricos

No existe forma de plantear un proceso de aprendizaje a partir de una única metodología. Más bien se trata de establecer una estrategia flexible, que permita adaptarse a cada etapa, así como al perfil de los estudiantes. Esto hace que se tengan en cuenta múltiples aspectos a la hora de diseñar el proceso de aprendizaje.

A. Aspectos conductuales

Un enfoque conductual implica entender el aprendizaje como un proceso con una entrada (estímulo) y una salida (respuesta). Este proceso está asociado con los aprendizajes anteriores, y con las consecuencias de las respuestas a los estímulos actuales. Si las consecuencias son positivas, existe un refuerzo. El aprendizaje, por tanto, puede ser interpretado, según esta teoría, como la formación de conexiones estímulo-respuesta a través de la exposición a un proceso de repetición y sus consecuencias [8].

Desde el punto de vista actual dentro del campo de la educación en ingeniería, los estudiantes suelen traer inercias desde etapas anteriores que hacen que sea difícil obviar los aspectos conductuales. Suelen necesitar un estímulo inicial para poder tener alguna referencia antes de atreverse a adentrarse en un proceso de aprendizaje autónomo. El examen tradicional y el refuerzo positivo del aprobado les sirve de guía para saber si

lo están haciendo bien o mal, y tienden a preferir problemas cerrados que puedan resolver en un examen siguiendo un método único para obtener un resultado.

B. Aspectos cognitivistas

La teoría cognitivista valora el proceso de aprendizaje que ocurre en la mente de los estudiantes: la memorización, el olvido, la elaboración, la transformación y el almacenaje a largo plazo de la información [9]. El aprendizaje, según esta teoría, se produce gracias al proceso de *asimilación* de nuevo conocimiento sobre el preexistente, y gracias al proceso de *acomodación*, por el cual la estructura interna del conocimiento se reajusta para adaptarse a la nueva realidad.

Desde el enfoque de la educación en Ingeniería, los estudiantes tienen modelos mentales preexistentes, que pueden ser confirmados y reforzados, o bien deben modificarse para acomodarse a la nueva información que reciben durante su proceso de aprendizaje [8].

C. Aspectos situacionales

El movimiento situacional se diferencia del conductualismo y del cognitivismo en que tiene en cuenta el papel que juega el entorno en la concepción del conocimiento, y en cómo este entorno afecta al proceso de aprendizaje. Desde esta perspectiva, el proceso de aprendizaje está situado dentro de una red social compleja, no pudiendo entenderse como una modificación de la estructura mental de un único individuo [6].

La práctica de cualquiera de las disciplinas de la ingeniería tiene encaje dentro de un enfoque situacional del aprendizaje: la ejecución de proyectos requiere colaboración y trabajo en equipo, los objetivos de cualquier proyecto están influenciados por los medios de los que se disponga y, por último, la práctica de la ingeniería implica participar y tener una identidad dentro de la comunidad.

D. Aspectos emocionales

El o la docente tiene un efecto directo sobre las emociones y la motivación de sus estudiantes, y viceversa. Cuando se emplean estrategias de aprendizaje activo como el Aprendizaje Basado en Problemas, este efecto adquiere más énfasis [10], [11]. De esta forma, este tipo de estrategias de aprendizaje tienen el potencial de crear vínculos emocionales entre los propios estudiantes, y entre estudiantes y profesores, pudiendo afectar positiva o negativamente al proceso de aprendizaje.

E. Aspectos motivacionales

A nivel académico, la motivación de los estudiantes tiene varias dimensiones que afectan a su desempeño: el nivel de empoderamiento, la percepción de utilidad, la sensación de éxito, el interés que se tiene, así como el sentimiento de sentirse cuidado o cuidada durante el proceso de aprendizaje, son cinco aspectos clave que influyen decisivamente en la motivación por aprender [5].

En el ámbito de la educación en ingeniería, es común introducir proyectos o problemas complejos con la idea de mejorar la adquisición de competencias mejorando la motivación de los estudiantes. Sin embargo, es necesario conocer los aspectos que mejoran o minan la motivación de los estudiantes, en especial aquellas habilidades transversales que pueden facilitar el proceso de aprendizaje [12].

F. Aspectos evaluativos

El uso de una evaluación formativa implica tener en cuenta el progreso de cada estudiante para dirigir su progreso hacia la consecución de los resultados de aprendizaje. Esto implica que las actividades evaluativas deben plantearse de tal forma que sirvan como instrumentos de aprendizaje [2]. El proceso de aprendizaje debe estructurarse, por tanto, no sobre unos contenidos, sino sobre unos resultados del aprendizaje, los cuales deben organizarse de una forma racional para poder establecer cuál es el nivel del aprendizaje de cada estudiante. Los resultados observados del aprendizaje (taxonomía SOLO) [13] permiten esta organización, facilitando, además del proceso de evaluación, el diseño de la estrategia de aprendizaje.

III. Descripción del proceso de aprendizaje

La experiencia se desarrolló durante el primer semestre del curso 2017-18 con un grupo de 42 estudiantes matriculados en la asignatura denominada *Regulación y Control de Máquinas Navales*, de 6 créditos ECTS, correspondiente al tercer curso y dentro del *grado en Tecnologías Marinas* impartido en la Universidad de La Laguna, y en la que se desarrollan conocimientos, habilidades y competencias vinculados con los siguientes cinco módulos:

1) Controladores industriales.
2) Sensores y Actuadores.
3) Control electromecánico.
4) Control hidráulico.
5) Control y Gobierno del buque.

La asignatura se diseñó buscando la implicación de los estudiantes desde un enfoque activo, en la que se simultanearon dos métodos de aprendizaje basados en estrategias conductuales, y situacionales. Estas estrategias se usaron teniendo en cuenta los resultados del aprendizaje pretendidos para esta asignatura y los aspectos que afectan a la motivación de los estudiantes, tal y como se explica en los epígrafes posteriores. Para este fin, se simuló la división de la asignatura en dos partes: *conocimientos* y *proyecto*. Se habla de simulación porque, a ojos de los estudiantes, al inicio del proceso de aprendizaje, ambas partes no tienen nada en común. Sin embargo, esta percepción se ve alterada según avanzan en el proyecto al tener que usar y actualizar parte de sus conocimientos.

A. Diseño de los resultados del aprendizaje

A fin de favorecer el proceso de evaluación formativa, se redactaron los resultados del aprendizaje estableciendo cuatro niveles usando verbos adecuados a cada uno de los niveles de la taxonomía SOLO.

- *Nivel I*

  - Identificar los elementos de un sistema de control (reguladores, sensores, transductores, actuadores).
  - Seguir los procesos de control en lazo cerrado y en lazo abierto.
  - Recordar las diferentes estrategias de control.
  - Nombrar las variables y parámetros que intervienen en el proceso de control.
  - Identificar los dispositivos usados para el control de los distintos procesos en el buque (reguladores, sensores, actuadores).
  - Identificar los distintos elementos y la simbología empleados en los controles electromecánicos e hidráulicos.
  - Identificar los componentes que intervienen en el control y gobierno del buque.
  - Seguir los procesos de los principales controles del buque (maquinaria principal y gobierno)

- *Nivel II*

  - Describir las diferentes estrategias de control y las estrategias para la sintonía de los parámetros PID.
  - Desarrollar diagramas de flujo vinculados a las estrategias de control.
  - Elaborar esquemas de control, esquemas hidráulicos y electromecánicos.
  - Combinar los elementos apropiados (reguladores, sensores, actuadores) para una planta específica.

- *Nivel III*

  - Explicar los efectos que tiene la variación de los diferentes parámetros PID sobre la planta controlada.
  - Explicar las causas por las que la planta puede desestabilizarse.
  - Aplicar una estrategia de control en lazo cerrado a un problema concreto.
  - Explicar las causas de avería de una máquina a partir de sus esquemas de control.
  - Analizar el funcionamiento de los componentes electrónicos, eléctricos e hidráulicos que intervienen en gobierno del buque.

- *Nivel IV*

  - Diseñar un sistema de control para una máquina en concreto.
  - Predecir los fallos de un sistema de control a partir del funcionamiento de la planta.
  - Construir un controlador para una aplicación definida.
  - Probar un diseño de control y evaluar su eficiencia.
  - Mejorar el diseño de un sistema de control eléctrico o hidráulico.
  - Diseñar esquemas de control.
  - Justificar un diseño con criterios de eficiencia y costes.

B. Proceso de aprendizaje vinculado a la adquisición de conocimientos

Uno de los aspectos que desmotivan a los estudiantes al enfrentarse a un problema complejo es precisamente la falta de conocimientos previos [12]. A pesar del interés que les suscita empezar un proyecto real, tienden a abandonarlo porque piensan que no tienen capacidad para desarrollarlo. En el caso de estudiantes que están acostumbrados a procesos educativos basados fundamentalmente en aspectos conductuales, tienden a abandonar prematuramente sin intentar aprender por sí mismos aquello que necesitan.

Para evitar este efecto negativo, se puso en práctica una estrategia de aprendizaje para la adquisición de unos conocimientos mínimos, la cual se basó en aspectos cognitivistas usando un proceso de repetición y refuerzo, pero desde el enfoque del aprendizaje activo. Esta idea se materializó en 5 módulos distribuidos en 14 seminarios de formación con tres sesiones según se muestra en las tablas I y II.

Tabla I
ESTRUCTURA DE LOS SEMINARIOS DE CONOCIMIENTOS

Sesión	*Duración*	*Descripción*
1^a	45’	Lección magistral por un grupo de estudiantes
2^a	30’	Test de entrenamiento o de evaluación
3^a	45’	Sesión de realimentación

Esta estrategia se desarrolló de la siguiente forma: cada semana, el profesor de la asignatura escogió un grupo de 5 estudiantes para impartir la lección de la semana siguiente. Para ello, el profesor compartía con todos los estudiantes de la asignatura los materiales necesarios para preparar la lección, en forma de referencias y enlaces, así como instrucciones para organizar la presentación. El grupo escogido cada semana impartía su lección, la cual solía contener errores de concepto, fallos en algunas de las explicaciones, en su mayor parte por la falta de experiencia de los estudiantes. El profesor anotaba todas estas cuestiones con el objeto de hacer aclaraciones posteriormente. Al finalizar la lección magistral, los estudiantes se presentaban a un test computerizado que usa una base de preguntas lo suficientemente amplia como para que los test de cada estudiante sean diferentes tanto en sus preguntas como en sus respuestas. Al finalizar el test de entrenamiento, los estudiantes obtienen una calificación de 0 a 10 puntos, pero no tienen acceso a las respuestas correctas de las preguntas ni a las respuestas que habían seleccionado. Posteriormente, el profesor pedía sus estudiantes que formulasen preguntas o planteasen cuestiones que quisieran aclarar. Estas cuestiones, junto con los errores cometidos en la lección magistral, eran aclarados en una sesión de realimentación.

Este proceso se repitió cada semana, hasta que se completaba cada módulo, momento a partir del cual los estudiantes se presentaban al último test, cuyo resultado (de 0 a 10 puntos), al contrario que el resto, sí computaba para la calificación de la asignatura.

Tabla II
DESCRIPCIÓN DE LOS SEMINARIOS POR MÓDULOS

Módulo	*Seminario*	*Descripción*
Introducción	0.1	Presentación de la asignatura.
Controladores Industriales	1.1	Control en lazo abierto. Control en lazo cerrado. Control en dos pasos y escalonado.
	1.2	Control proporcional (P), proporcional-integral (PI), proporcional-derivativo (PD) y proporcional-integral-derivativo (PID).
	1.3	Sintonización de controladores. Usos industriales. Reguladores de velocidad en motores y turbinas.
Sensores y Actuadores	2.1	Medidas de posición, velocidad, presión, caudal, nivel y temperatura. Otros tipos de medidas.
	2.2	Elementos actuadores: Válvulas, servomotores y actuadores.
Control Electromécanico	3.1	Componentes electromecánicos.
	3.2	Lectura de esquemas eléctricos, nomenclatura y simbología.
	3.3	Diseño y montaje de sistemas electromecánicos.
Control hidráulico	4.1	Componentes hidráulicos.
	4.2	Lectura de esquemas hidráulicos, nomenclatura y simbología.
	4.3	Diseño y montaje de sistemas hidráulicos (ejemplo del gobierno del buque mediante servotimón).
Control y Gobierno del Buque	5.1	Control de la maquinaria principal y auxiliar.
	5.2	Control de la planta eléctrica del buque.

Paralelamente a los test, los estudiantes hicieron una práctica de una hora de duración para cada módulo (un total de 5 prácticas). Estas prácticas no computaban para la calificación de la asignatura, pero sí eran obligatorias para poder aprobarla. El objetivo de estas prácticas era el exponer a los estudiantes a sistemas reales con el objetivo de reforzar sus conocimientos adquiridos a través del sistema de los test de entrenamiento.

C. Proceso de aprendizaje vinculado al desarrollo de proyectos

A la finalización del primer módulo los estudiantes ya disponían de unos conocimientos mínimos para poder enfrentarse al problema ligado al proyecto que tendrían que desarrollar para resolverlo. El tiempo necesario para poder abordar el proyecto se tomó del resto de horas de prácticas no utilizadas (trabajo presencial con el profesorado), así como del tiempo destinado al trabajo autónomo de los estudiantes (trabajo autónomo de cada grupo de estudiantes).

Cada uno de los grupos, compuestos entre un mínimo de 4 y un máximo de 6 estudiantes, siguió el mismo proceso para resolver el problema que se les planteó al inicio del curso. Este proceso consistió en el seguimiento de los 5 pasos ilustrados en la figura 1. En la *clarificación* se discute y se definen los

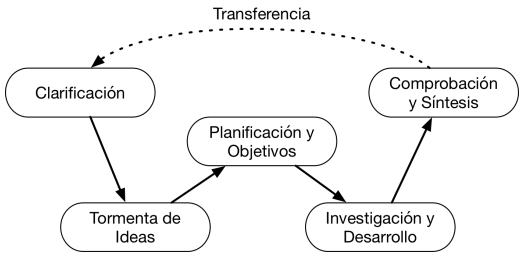


Fig. 1. Proceso de 5 pasos del aprendizaje basado en problemas.

detalles del problema. En la *tormenta de ideas* se plantean posibles soluciones. Durante la *planificación y objetivos* se establece un plan para abordar el problema a través de unos objetivos de aprendizaje. En la *investigación y desarrollo* se aborda el problema y se desarrollan sus soluciones; en el caso de los proyectos se diseñan y/o se construyen dispositivos. Por último, durante la fase de *comprobación y síntesis*, se abre un proceso de reflexión y análisis donde se discute si se ha resuelto o no el problema, se plantean mejoras o se definen alternativas. Al finalizar este proceso, las habilidades adquiridas pueden transferirse para abordar otros problemas con un mayor nivel de experiencia.

Este proceso de resolución de problemas se aplicó en este curso al desarrollo de un controlador para posicionar un pistón hidráulico. Para ello los estudiantes fueron abordando el problema de forma gradual, guiados por sus profesores. Éstos pautaban las actividades de aprendizaje en función de cada paso, de forma que los estudiantes pudieran marcar su propio ritmo de trabajo, con la limitación de una fecha de entrega. Como entregables, los estudiantes tenían que elaborar un prototipo funcional (ver fig 3), así como un artículo donde explicasen el funcionamiento de su prototipo y los resultados obtenidos.

La evaluación formativa del proyecto se desarrollaba durante sesiones de trabajo (ver fig. 2) en la que los estudiantes planteaban sus dudas y el profesor reforzaba aquellos conocimientos y/o habilidades necesarias para que los estudiantes pudieran continuar con su trabajo.

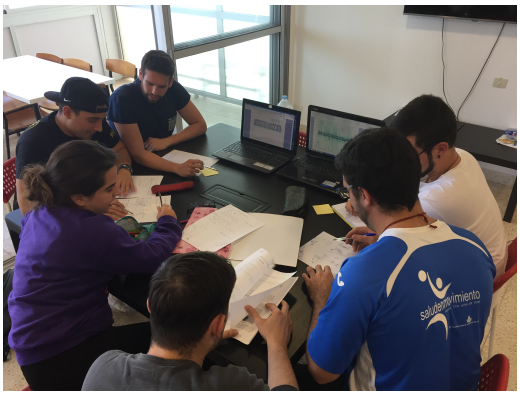


Fig. 2. Sesión de trabajo durante el desarrollo del proyecto con un grupo de estudiantes.

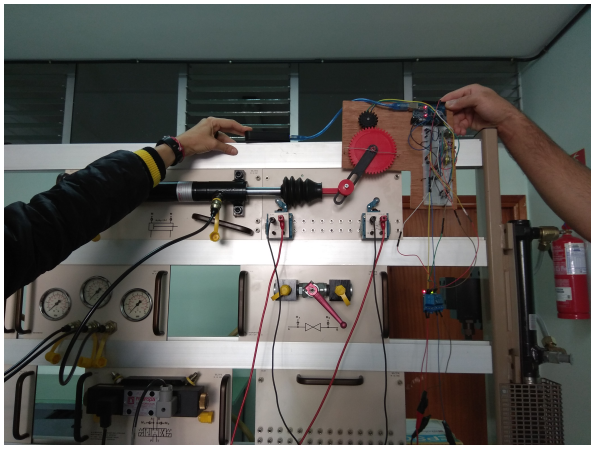


Fig. 3. Pruebas de uno de los prototipos de uno de los grupos de estudiantes.

Para poder ser calificados, los estudiantes tenían que construir y testear un prototipo funcional. La evaluación sumativa del proyecto se realizaba a través una entrevista grupal, mediante la cual era posible posicionar a cada estudiante en alguno de los niveles de los resultados de aprendizaje. El prototipo en sí no era calificable, aunque sí era un requerimiento para poder acceder a la entrevista. Para poder superar el proyecto, era necesario como mínimo contestar de forma satisfactoria durante la entrevista grupal a las preguntas asociadas al primero de los niveles descritos en la sección III-A. La calificación era siempre individual, en función de las respuestas que cada estudiante daba a las preguntas que se le planteaban individualmente y a todo el grupo, de 1 a 10 puntos, en función del nivel alcanzado: Nivel I (5.0 a 5.9), Nivel II (6.0 a 6.9), Nivel III (7.0 a 8.9), y Nivel IV(9.0 a 10.0).

IV. Resultados obtenidos al finalizar el proceso de aprendizaje

Los estudiantes respondieron satisfactoriamente al proceso, mostrando una evolución positiva a lo largo de su aprendizaje. Estos resultados se reflejaron en una calificación que ponderaba cada una de las pruebas con diferente peso siguiendo el criterio de los profesores de la asignatura, el cual otorgaba el siguiente peso a cada una de las pruebas calificables (todas calificadas de 0 a 10 puntos): Media de los tests de las 5 unidades didácticas (30%), calificación del artículo (14%), y resultado individual de la entrevista grupal (56%). Para superar la asignatura, se pedía obtener 5 o más puntos en todas las pruebas; en caso de no superar alguna de las pruebas, sólo puntuaría la calificación más baja.

A. Resultados de las pruebas de conocimientos

La figura 4 muestra los resultados acumulados para los 5 módulos del primer y segundo test de entrenamiento y el test calificable, ordenados de izquierda a derecha. El efecto de los test de entrenamiento no es uniforme; se observa una ligera mejora entre el primer y el segundo test de entrenamiento. Sin embargo, la gran mejora se observa en el test calificable, cuando los estudiantes saben que se juegan una nota. Este efecto es causado por la procrastinación de los estudiantes, así como por su necesidad de sentir presión antes de ser capaces de dedicar el tiempo de estudio necesario para mejorar sus calificaciones.

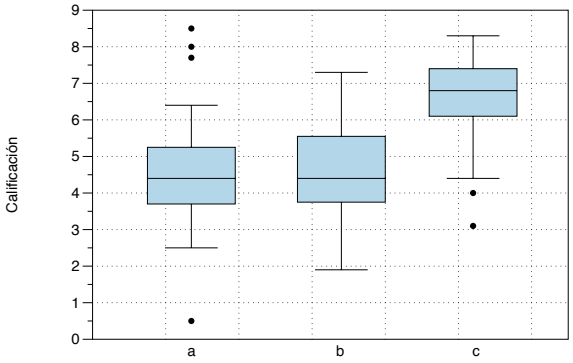


Fig. 4. Resultados acumulados de las pruebas de conocimientos. (**a**) Primer test de entrenamiento. (**b**) Segundo test de entrenamiento. (**c**) Prueba computable para la evaluación.

En cualquier caso, los resultados, teniendo en cuenta que no se han impartido lecciones magistrales por parte del profesorado, son buenos o muy buenos, con un número de suspensos muy bajo en las pruebas de conocimientos.

B. Resultados globales de la asignatura

De los 42 estudiantes matriculados en la asignatura, 7 no se presentaron a ninguna prueba; de los 35 restantes, 6 suspendieron debido al proyecto, y otros suspendieron al no superar las pruebas de conocimientos. La mediana obtenida es de 6.7 puntos (ver fig. 5). Estos resultados implican que, tras la evaluación de los proyectos, aproximadamente la mitad de los estudiantes han alcanzado los resultados del aprendizaje correspondientes al nivel II, mientras que la otra mitad han alcanzado los resultados del aprendizaje correspondientes al nivel III.

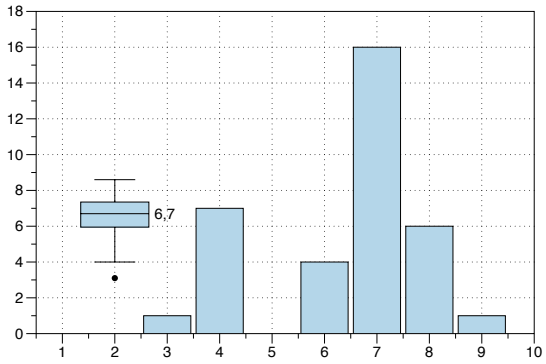


Fig. 5. Resultados globales de la asignatura

V. Conclusiones

El uso de estrategias de aprendizaje activo, vinculando teorías avanzadas como el aprendizaje situacional, son posibles en el

campo de la Ingeniería de Control. Si bien es cierto que es posible controlar los factores que afectan a la motivación de los estudiantes con el objetivo de mejorar los resultados del aprendizaje, y por tanto los resultados académicos, también es cierto que entran en juego otros factores, como pueden ser las inercias previas y los efectos de la procrastinación. Esto obliga a los docentes a un mayor esfuerzo a fin de asegurar la consolidación de los conocimientos necesarios para la posterior adquisición de las compentencias requeridas para la resolución de problemas dentro de la Ingeniería de Control. Estos conocimientos pueden ser adquiridos a través de estrategias conductuales, pero deben luego aplicarse estrategias situadas dentro del entorno de aprendizaje, en función de las posibilidades del centro y de los estudiantes. Esto implica usar los exámenes como herramientas de aprendizaje de conocimientos, repartiendo su aplicación para conseguir el esfuerzo necesario de los estudiantes. Si los conocimientos adquiridos son luego aplicados en proyectos, es posible consolidarlos a partir de su continua adaptación a la realidad y su vinculación al entorno que rodea a los estudiantes.

REFERENCIAS

[1] M. L. Montero Curiel, *El proceso de Bolonia y las nuevas competencias*. Junta de Extremadura. Consejería de Educación, 2010.

[2] C. Hamodi, V. M. López Pastor, and A. T. López Pastor, "Medios, técnicas e instrumentos de evaluación formativa y compartida del aprendizaje en educación superior," *Perfiles educativos*, vol. 37, no. 147, pp. 146–161, 2015.

[3] M. A. Moreira, "¿Al afinal, qué es aprendizaje significativo?" *Qurriculum: revista de teoría, investigación y práctica educativa*, no. 25, pp. 29–56, 2012.

[4] R. M. Ryan and E. L. Deci, "Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being." *American psychologist*, vol. 55, no. 1, p. 68, 2000.

[5] B. D. Jones, "Motivating students to engage in learning: The music model of academic motivation," *International Journal of Teaching and Learning in Higher Education*, vol. 21, no. 2, pp. 272–285, 2009.

[6] A. Johri, B. M. Olds, and K. O'Connor, "Situative frameworks for engineering learning research," in *Cambridge handbook of engineering education research*, A. Johri and B. M. Olds, Eds., 2014.

[7] E. Moesby, "Curriculum development for project-oriented and problem-based learning (POPBL) with emphasis on personal skills and abilities," *Global Journal of Engineering Education*, vol. 9, no. 2, pp. 121–128, 2005.

[8] W. C. Newstetter and M. D. Svinicki, "Learning theories for engineering education practice," in *Cambridge handbook of engineering education research*, A. Johri and B. M. Olds, Eds., 2014.

[9] M. Alias, T. A. Lashari, Z. A. Akasah, and M. J. Kesot, "Translating theory into practice: integrating the affective and cognitive learning dimensions for effective instruction in engineering education," *European Journal of Engineering Education*, vol. 39, no. 2, pp. 212–232, 2014.

[10] M. M. MacKinnon, "Core elements of student motivation in problem-based learning," *New directions for teaching and learning*, vol. 1999, no. 78, pp. 49–58, 1999.

[11] D. Bowman and P. Hughes, "Emotional responses of tutors and students in problem-based learning: lessons for staff development," *Medical Education*, vol. 39, no. 2, pp. 145–153, 2005.

[12] C. E. Mora, B. Añorbe Diaz, A. M. Gonzalez-Marrero, J. Martin-Gutierrez, and B. D. Jones, "Motivational factors to consider when introducing problem-based learning in engineering education courses," *International Journal of Engineering Education*, vol. 33, no. 3, pp. 1000–1017, 2017.

[13] J. B. Biggs and K. F. Collis, *Evaluating the quality of learning: The SOLO taxonomy (Structure of the Observed Learning Outcome)*. Academic Press, 2014.

Project Based Learning on Industrial Informatics: Applying IoT to Urban Garden

Javier Hormigo and Andrés Rodríguez
Department of Computer Architecture, University of Málaga,
29071 Málaga, SPAIN
Emails: fjhormigo@uma.es , andres@uma.es

***Abstract*—The fast evolution of technologies forces teachers to trade content off for self-learning. PBL is one of the best ways to promote self-learning and simultaneously boost motivation. In this paper, we present our experience introducing project-based learning in a last year subject. New Internet of Things (IoT) topic allows us to carry out complete projects, integrating different technologies and tools. Moreover, the selection of open-source and standard free technologies makes easy and cheap the access to hardware and software platforms used. We carefully have picked communication, data management, and programming tools that we think would be attractive to our students. They can start making fast prototyping with little initial skills and, at the same time, these are serious and popular tools widely used in the industry. In this paper, we report on the design of a project-based learning for our course and the impact this has on the student satisfaction and motivation. Surveys taught us that tuning the courses towards developing real projects on the field, has a large impact on acceptance, learning objectives achievements and motivation towards the course content.**

I. Introduction

This work presents the implementation of a Project Based Learning (PBL) methodology in the subject of Industrial Informatics. This is a 60-hour course corresponding to the fourth year of Electronic, Robotic and Mechatronic Engineering degree in the Industrial Engineering School at Universidad de Málaga. This year, there were about 40 students in the course. Although the number of students has been growing exponentially in the past (because the recent degree implantation), we think that it is not going to grow much more next years. The presented project belong to a more general Innovative Education Project (PIE), which aims to generalize the use of the same hardware platform, specifically the Raspberry Pi, through different courses of the same degree.

There are multiple reasons for selecting a PBL methodology. First, taking into account the fast evolution of technology in this field, preparing the students for self-learning should be a priority for any engineering curriculum. Second, being a last year subject, a more practical approach is sought. Third, it has been demonstrated that PBL greatly improves motivation of students [1]. This quality is very important since our students are typically reluctant to embrace self-learning. On the other hand, teamwork skills are also fundamental for any engineer nowadays. That is the main reason why cooperative learning has been also included in the course. Besides that, the student can accomplish a complete project by working in groups and it also facilitates to monitoring the work progress by the teachers.

Internet of Things (IoT), together with cyber-physical systems, cloud computing, and machine learning is the foundation of the new industry, which has been called ”Industry 4.0”. In this course, we have the opportunity to introduce most of these ideas to the students through Industrial Informatics. To be really effective, the PBL methodology requires of a credible and tangible project. We thought that an urban garden could be an ideal place to design a cyber-physical system by deploying several IoT nodes. These IoT nodes could gather data from the garden and also perform some actuation. The collected data could be also processed in the cloud and machine learning could be used to take the different decisions.

We knew that the faculty of Biology has an urban garden for teaching and research, and we though inter-discipline collaboration may be also an interesting way for enriching the experience. Therefore, we arrange a cooperation with the Plant Biology Department to launch a project that could be useful for both, their students and ours. In a first stage, our students would design a system mainly to collect and monitor information from the urban garden. In a second step, biology students will use the system in their subjects and they will provide feedback and test information about it. In a third step, our students (the next year) will use the feedback to improve the system and also to include actuation capabilities on it. This refinement process could be repeated for several years.

Another important aspect of the project is the use of accessible open source software/open hardware platforms. The extensive community of developers who use these open systems offers a large number of online examples, tutorials, videos, etc. These are materials that our students prefer better than classic textbooks o reference manuals. In addition, the use of such accessible hardware platforms stimulates natural curiosity and desire to try and experiment on their own in our students. Many of them show interest in acquiring these materials for using it at home on small do-it-yourself projects.

II. Project description

In this section, we describe the project and how we have implemented it in our course. The project statement was given to the student after the first three weeks where they had been working on more general topics about industrial informatics. Then, they had about twelve weeks to develop the proposed project. Fist, let show you the project statement that we gave to the students.



Fig. 1. Urban garden at Science School facilities

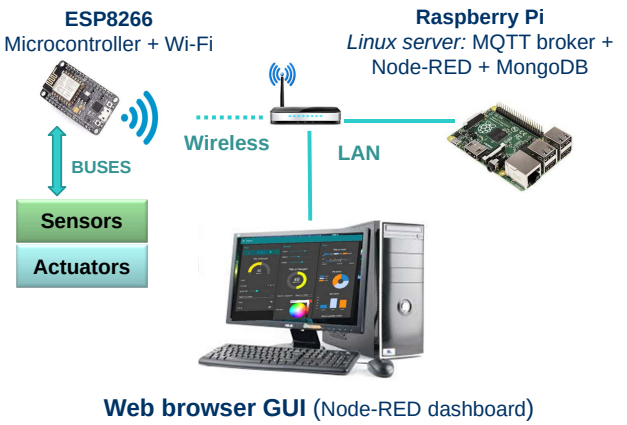


Fig. 2. Project system main architecture

A. *Project statement*

The Department of plant biology of the University of Málaga manages an urban garden in the Faculty of Sciences (Fig.1) to study about this and other topics. So far the collection of data required for these studies is performed manually by the researchers or students of related subjects. With this project, we want to improve the process of collecting and processing data through the use of ”Internet of Things”. For this reason, we want to develop a system based on a network of ”sensor nodes” able to collect useful data for their studies, and a ”base station” that receives, processes, and displays the information to these researchers in a user-friendly way. The system is completed with ”actuator nodes” that can receive orders to act on the environmental conditions of the cultivation (irrigation, lighting, ventilation,...).

In a first phase, we will focus especially on the system for data collection and representation of the information. In a second phase, we will focus on the control system to act on cultivation according to the collected data. The first phase will be carried out by the students of Industrial Informatics course 2017-18, while the second phase will be performed by students in the following year. Therefore, it is fundamental to generate a well-structured system and a complete and thorough documentation, for both users and maintenance or further development.

1) Description and system requirements: The project will consist of designing and implementing a system for monitoring and control of urban gardening. Such a system shall include the following elements:

- Two types of IoT nodes based on the module Wi-Fi ESP8266. The first, the ”sensor node”, may lay or stand on any part of the garden and will measure, store temporarily and transmit wirelessly, fundamental parameters (temperature, humidity, light exposure...). The second, the ”actuator node”, will be used to control solenoid valves from irrigation and other actuators, receiving orders via the wireless communication network.
- A ”base station” based on the Raspberry Pi will implement a SCADA system and a database. The ”base station” will serve also as a message broker for IoT communication (using MQTT Protocol) and it will receive the information from the ”sensor nodes” (we must assume a network of several sensors). The ”base station” is responsible for displaying the gathered data to the users, store and upload them to the cloud. This device may have a wired connection.
- A graphical web interface for interaction with the users. This will be programmed using Node-RED.
- The ”base station” will also need a database to store the measured data and accept requests to retrieve that information. Then, it must allow analyzing and displaying these data. A NoSQL database system, called MongoDB, has been already installed. It allows simple and direct storage of documents in JSON format.
- The following services have already been installed in the RaspberryPi and they are already running: an MQTT broker (mosquitto), Node-RED and the NoSQL database MongoDB. In the laboratory, the Raspberry IP address will be 172.16.53.xx, where xx is the number that appears on the board ID (on the Ethernet connector). The ports where those installed services respond are the standards:

TABLE I
STANDARD TCP PORTS USED FOR THE DIFFERENT SERVICES

Service	Address in LAN/URL (IP: port)
mosquitto (MQTT)	172.16.53.xx:1883
Node-RED	http://172.16.53.xx:1880
MongoDB	172.16.53.xx:27017

The functional requirements of the system are:

- The system must collect and store at least the data of temperature and humidity, sunlight exposure and soil moisture.
- The last values and also the stored ones must be displayed through a graphic interface. The interface must allow providing queries to sort and represent graphically those values. It will analyze the extracted data (average values, standard deviation, boundaries, etc.). It must be allowed

downloading the raw data to a file for analysis with other tools.
- The user will be able to select the frequency in which data for each parameter will be collected.
- All nodes will communicate with the ”base station” using a common interface in the same network (MQTT messages with content formatted in JSON).

The non-functional requirements of the system are:

- **Autonomy**. The system must be maintained with as less as the possible human intervention. To do this, the power consumption in the nodes will be a very important part. Different ways of energy saving should be used, thinking that the nodes will operate with batteries which will be charged by solar panels.
- **Compatibility**. The system must allow the coexistence of nodes of different types and from different development team (working group), as well as different base stations. To do so, it will be necessary to define a standard interface of communication for all IoT nodes (which commands are they going to accept, the format of those, which sensors values are going to be transmitted, ...).
- **Accuracy**. The system must provide reliable and synchronized data. Thus, the different sensors must be calibrated to provide consistent data on standard measurement units and the nodes must be synchronized in time and date.
- **Security**. Although the security of the system is not a key aspect in this preliminary phase of the project, a study of possible vulnerabilities and a proposal for security controls must be included.
- **Friendliness**. The end-user of the system may not have any knowledge of electronics or computer science. Hence, the user interface and the routine operations of maintenance and use should be very simple. They have to be perfectly explained in a user's manual.
- **Maintenance**. It must be easy to repair or expand the system, because, for several years, it will be used and maintained by people other than those who designed it initially. For this reason, all the elements of the system (both hardware and software) must be perfectly documented.

2) Work plan, results and project evaluation: Below is the proposed work plan:

1. The technical description of the two types of IoT nodes. A document showing which sensors are going to be used, how are they going to be connected to the ESP (number of pins, communication protocol), which functions are going to be developed for communication with sensors, actuators, and base station. Furthermore, an initial budget of the nodes. (week 6)

2. The first prototype of the IoT ”sensor node”. A functional prototype of the node which must be able to control all sensors and perform data collection. However, the communication with the ”base station” does not have to be implemented yet. (Week 7)

3. The base station nodes interface (MQTT). A document defining the messages that will be used to communicate the nodes with the base station, the protocols, and the syntax. (Week 8)

4. The technical description of the whole system. (week 9)

5. The Testing, calibration and security plan of the whole system. Document describing which tests will be done to calibrate and check the correctness of the system. Furthermore, It must describe how to detect possible security problems and propose some solutions. (Week 10)

6. The final prototype IoT nodes (sensor and actuator) and the first prototype of the base station. (week 12)

- The IoT nodes (with whole functionality) which communicate with the base station according to the specified interface. Also the complete documentation of the node.
- the base station which accepts messages from the nodes, check and store them, etc. It is not necessary to have the full user interface.

7. The complete prototype (nodes-base station-SCADA). A demonstration-presentation, development and user documentation. (week 14)

8. The individual extension. Each component of the development team, on an individual basis, must perform an extension/modification of their own system, based on the proposal of the teacher. (week 15)

Based on the qualifications of the delivered results, the score of the project shall be calculated using the following weights distribution:

- The first prototype of the ”sensor node”. 10% (group score)
- Plan of testing, calibration, and security. 10% (group score)
- Final sensor and actuator nodes. 30% (group score)
- Complete project. 30% (group score)
- Individual extension. 10% (individual) + 10% (if the whole group passes it)

3) List of available components: In the laboratory, there are the following elements which can be used at the discretion of each group to design their system:

- Two NodeMCU DevKit v1.0 (ESP8266)
- A RaspBerryPi B+
- Digital temperature and humidity sensor (DHT11 / DHT22 serial bus with its own protocol)
- (DS18B20 with One-wire bus) digital temperature sensor
- (Analog output) TMP36 temperature sensor
- (Analog output) soil moisture probe
- Light sensor (SPI bus / photoresistor)
- ADC Converter 4 channels (ADS1015 with I2C bus)
- Real time clock(ZS-042 with I2C bus module)
- Rechargeable battery (3.7V 1100mah)
- Solar panel (6V 1W)
- Battery Charge controller
- Relays (5V)
- Small material: connection wires, NPN transistors, resistors, capacitors, leds, buzzers, push-buttons,...

These elements are enough to meet the minimum requirements of the system. However, besides these, the groups could decide to buy or build other elements that they believe necessary for their system.

B. Involved Technologies

As we mention above, the project is developed using several open source software programs and open hardware platforms. Here we present them.



Fig. 3. NodeMCU DEVKIT v1.0 Wi-Fi developing microcontroller board

1) ESP8266 platform : For IoT sensor and actuator nodes implementation we use the Wi-Fi enabled NodeMCU DEVKIT V1.0 [2] (Fig.3), an open hardware development board based on ESP-12-E (4MBytes flash version). This board has an ESP8266EX core, a microcontroller that integrates a Tensilica L106 32-bit RISC processor, which achieves extra-low power consumption and reaches a maximum clock speed of 160 MHz. The Real-Time Operating System (RTOS) and Wi-Fi stack allow about 80% of the processing power to be available for user application programming and development. The board is programming using Lua scripts thanks to the open-source firmware NodeMcu[3], that provides a complete set of ready to use modules [4] and helps developers to prototype their IoT product within a few code lines.

Once the firmware is flashed using the convenient onboard USB interface, the Lua scripts are easily uploaded to the board flash using the development environment (ESPlorer IDE [5] Fig.4). the user can even run Lua sentences from an interactive console. Results and messages are printed on the console while connected through USB interface. Thus, fast prototype debugging is easy.

This ESP8266 based boards can also be programmed using C language and the same tools and IDE used for Arduino's family microcontrollers.

2) Raspberry Pi platform: For monitoring, data acquisition and control programming we use the well-known Raspberry Pi platform [6]. The Raspberry Pi boards are running the latest Raspbian operating system (a Linux distribution) and for programming our IoT applications we use Node-RED [7], a flow-based programming tool for the Internet of Things. Node-RED programming tool and deployed programs are running on

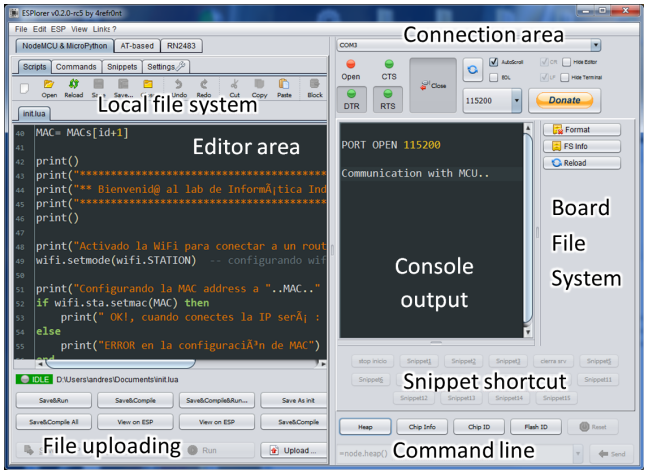


Fig. 4. ESPlorer IDE

the Raspberry Pi, but we also use the board to run a database server (MongoDB) for managing all data gathered from IoT nodes and an IoT communication service (an MQTT broker) for connecting all IoT nodes. All nodes are connected using a standard TCP/IP connection over Wi-Fi and a wired Ethernet connection in the case of the Raspberry Pi board.

3) MQTT protocol: It's very easy to install your own IoT message broker on the Raspberry Pi using the open-source MQTT broker Eclipse Mosquitto [8]. MQTT [9] stands for Message Queue Telemetry Transport and is a machine-to-machine (M2M) Internet of Things connectivity protocol. The MQTT protocol provides a lightweight method of carrying out messaging using a publish/subscribe model. This makes it suitable for the Internet of Things messaging such as with low power sensors or mobile devices such as phones, embedded computers or microcontrollers. It is useful for connections with remote locations where a small code footprint is required and/or network bandwidth is at a premium.

MQTT says nothing about the format in which the data should be sent, we have chosen using JSON (JavaScript Object Notation) [10] to format our messages because is a very compact and easy to manage format and is native for Node-RED, our programming tool.

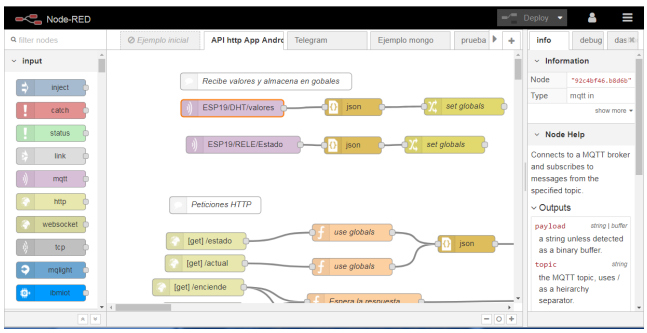


Fig. 5. Node-RED programming environment

4) Node-RED programming tool: Node-RED is an open-source flow-based programming tool for wiring together hardware devices, APIs, and online services in new and interesting ways [7]. It provides a browser-based editor (Fig.5) that makes it easy to wire together flows using the wide range of nodes in the palette that can be deployed to its runtime in a single click. Most of the programming can be achieved without writing a single line of code, but users also have the flexibility of programming the behavior of a general "function" node using JavaScript code. It has direct support for MQTT communication with nodes for publishing (sending data) and subscribing (receiving data) on MQTT topics. It also has nice support for MongoDB database, where data represented in JSON can be directly stored in the database and can be queried later on. Data structures are managed by Node-RED as JavaScript objects so their translation to JSON is flawless.

Node-RED also offers a set of nodes to build a dashboard, a very easy way to program an interactive web user interface [11]. You can show data from sensors graphically (gauges, charts, etc.) and also receive commands from users (buttons, selectors, sliders, etc.). It makes it ideal for programming the monitoring and data exploration application for our IoT project (Fig.6).

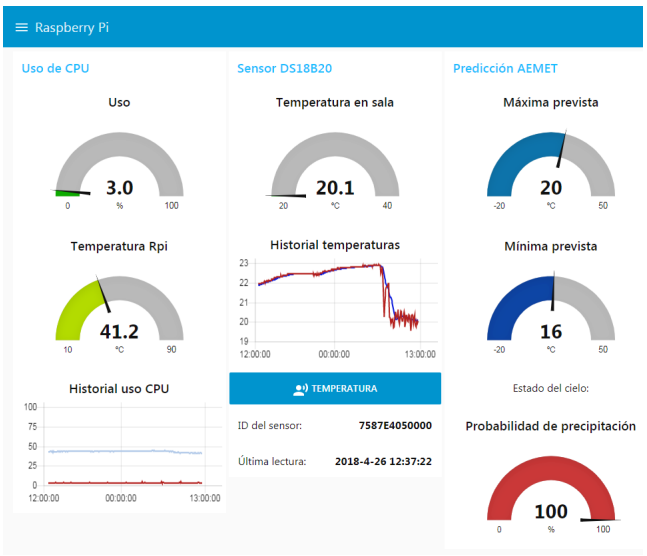


Fig. 6. Node-RED dashboard UI example

5) MongoDB database: We have chosen this free, open-source, No-SQL database to manage all data gathered from our IoT nodes. MongoDB [12] stores data in flexible, JSON-like documents, meaning fields can vary from document to document and data structure can be changed over time. It can store directly the data managed by Node-RED represented in JSON, making the use of the database very easy for students who are not familiar with the classic SQL database design process.

III. Course Planning and Developed Activities

This course is organized in 15 weeks with 4.5 hours of in-person class. We concentrated the sessions such as there is only one session per week. The students were divided into groups of their own election. Each group had three or four students and they had to develop a complete system. First, they worked on more general topics about industrial informatics for three weeks. Then, the project was developed in the last 12 weeks. We have prepared some introductory exercises for presenting and getting an initial insight into each technology and tool, but not further teaching material preparation was needed. There are plenty of examples, tutorials, videos, etc. available online that the students can use for learning about each topic. Moreover, the students seem to prefer this kind of online community supported materials over the classic and formal textbooks and manuals.

The evaluation of the course was defined following [13] in this way: 15% for handing in all request on time (failing more than 20% of requests means not passing the course); 25% from a test of basic knowledge which is compulsory to pass with an A, but there are several sittings(this part is grade according to the number of sitting utilized); 50% the grade of the project; and 10% participation in class and within their own groups.

In the first four weeks of the project, the students had to focus on developing the "sensor node". We provided technical documentation and links for the ESP platform and all sensors. We also organized a jigsaw to allow the student to acquire the fundamental concepts required to use the ESP platform with nodeMCU and Lua. Furthermore, the documentation we asked for in this period, was intended to provoke they stop working to plan and think about the system they had to develop. At the end of this period, they showed us the first prototype of the sensor node. It was able to read the information from a few sensors.

In the following two weeks they were focused on the communication between the sensor node and the base station. Along with the references for learning about MQTT, JSON, node-RED, and MongoDB, a new jigsaw was organized with this content. Groups were asked to propose a syntax and protocol for communicating IoT nodes and base station. Their proposal should have been used to define a standard protocol for all groups. However, during the process of discussing this standard, we realized that the activity was very time consuming and students did not participate as expected. Hence, in the end, we had to define the standard protocol based on the ideas proposed in the class. We also used a guided exercise to interconnect IoT nodes with the base station through a wifi network. Nevertheless, although the process to program the ESP-12E module for connecting it to the wifi network was thoroughly explained in the exercise, they had serious problems to achieve this goal. Those were mainly caused due to the event-driven nature of the Lua programming language.

During the following three weeks, they developed the communication between the sensor node and the base station using the messages and very simple protocols defined in our

standard. They used Lua to program the IoT nodes to send messages to the base station and receiving other messages from it. At the same time, they used node-RED at the base station to process the received messages from the IoT nodes and send others messages back. At the end of this period they had to hand in a prototype of the system which was peer-reviewed into different ways: using the sensor node and base station of the same group, but also using the sensor node of one group with the base station of the group that was evaluating. The latter test reveals that many prototypes did not fulfill the standard, mostly because many groups did not respect the key names for the key-value pairs within the messages. In this period of time, another important aspect they started to investigate was how to use the deep-sleep mode of the ESP8266 to save energy.

After Christmas holidays, they had the first sitting of the test of basic knowledge. This test consisted in a few very simple theoretic questions and basic programming exercises using Lua and node-RED. On the other hand, they had two weeks to finish the project. At this point, every group was dealing with their own problems. In the second last week of the course, they presented their project and showed the working prototype, in front of the teachers and their classmates. They also had to answer some general questions about their design. In the last session, we asked for an extension of their own project on an individual basis. We proposed the same extension for all student and they had to suggest the required changes in both the IoT node and the base station. This exercise was performed in class as an exam. Although this exercise seems completely individual, it should actually encourage to help the group-mates because there was a component of the mark which depended on the fact that all the members of a group pass the exercise. In practice, if this happened, they double the mark. However, only two groups achieved this goal.

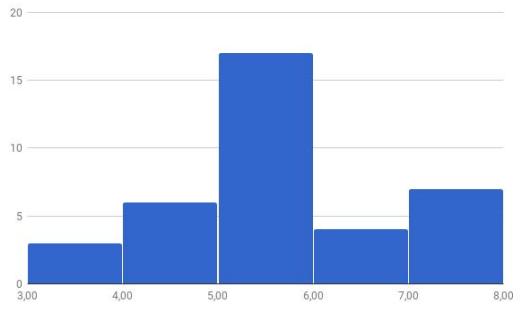
IV. Results and discussion

The results have been bittersweet. Following we present several facts about the obtained results.

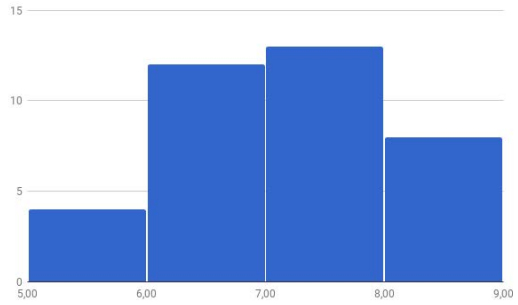
Fig.7a shows the distribution of the marks obtained in the project for each student. Most of the students handed in just acceptable projects and even one group a borderline one. Furthermore, the marks of the projects went down because only a few of the students accomplished the individual extension.

After including the rest of components most students improved their marks, Fig.7b shows the distribution of the final marks obtained in the course for each student. Only about 50% of student passed the basic test in the first sitting, although most of the rest of students only failed in one part. About 40% of them passed the test in the second sitting and only 3 students (8%) passed the test in the third sitting. In the end, none failed the basic test.

Only 2 students withdrew from the course. One of them failed ill and had to quit. In both cases, that happened at the beginning of the course. There is also one student that never attend a class.



(a) Project



(b) Course

Fig. 7. Distribution of the final marks obtained for the project and the course

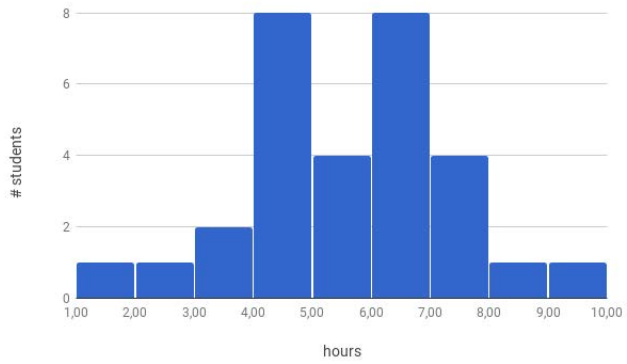
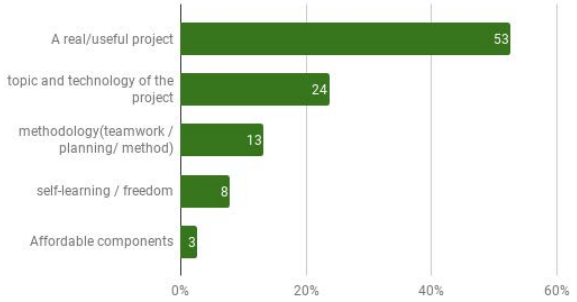


Fig. 8. Distribution of the number of hours out of class per student

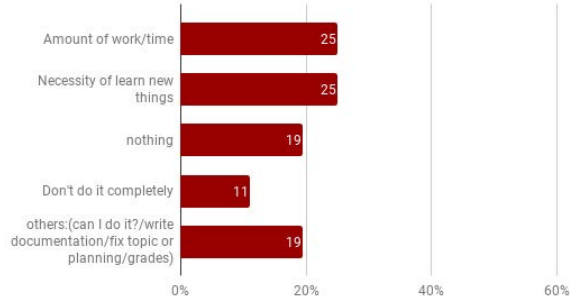
Another interesting information is the number of hours out of class that each student used in this course. Near to the end of the course, we asked them to estimate anonymously the mean of the hour per week they had spent in this course at home. The result of the survey is shown in Fig.8. According to the number of ECTS, they should spend about 6 hours per week and most of them said to use between 4 and 8 hours. Even so, the mean, 5.2 hours, is a little low and extreme cases are too disperse for being satisfactory. Hence, some measures should be added to correct this in next courses.

A. Student perception

We have conducted three quick surveys along the course. The student had to write anonymously the best and the worst aspect of the course so far in two minutes. The first survey was conducted after providing them with the project statement. They had time to read the document and discuss the project with their teammates. The results of the survey are summarized in Fig.9. In Fig.9a, it is easily observed that they were excited about the project, especially with the fact that it sounds (and it was) a real project. They appreciate that the project could be useful to someone. The topic and technologies required also appeals to them and less the methodology and freedom. However, they are also worried about the amount of work required to develop the project and the necessity of learning new technologies. It is alarming that 25% of student thought that "learn new content" is the worst thing of the subject, when they supposedly enrolled in this course to learn this content. On the other hand, almost 20% of the students do not see any negative aspect.



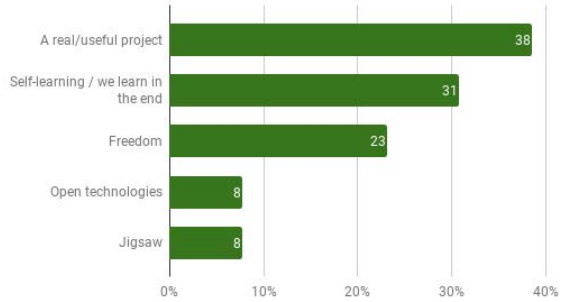
(a) Best



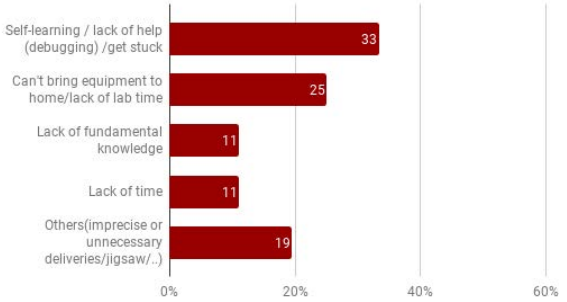
(b) Worst

Fig. 9. Student perception after giving them the project statement

The second survey was conducted after working on the project for several weeks. The results are shown in Fig.10. The students were working on the sensor node using Lua as the programming language. Most of them were having important difficulties to debugging their codes. The project is still in the first position as the best of the course but self-learning is close behaving being claimed by 31% of the students (see Fig. 10a). In contrast, another 33% of students consider self-learning and the lack of enough help as the worst of the course (see Fig. 10b). That could be explained by the fact that the first group



(a) Best



(b) Worst

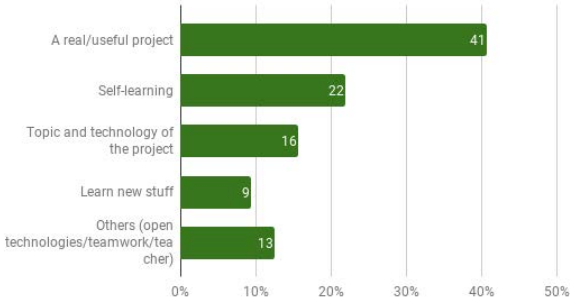
Fig. 10. Student perception after working on the project several weeks

of students had overcome the steps described in [14] but the second group had not. They consider that the second important problem is the fact that they could not bring the equipment to home and the lack of time in the laboratory. This topic was a continuous source of complaints.

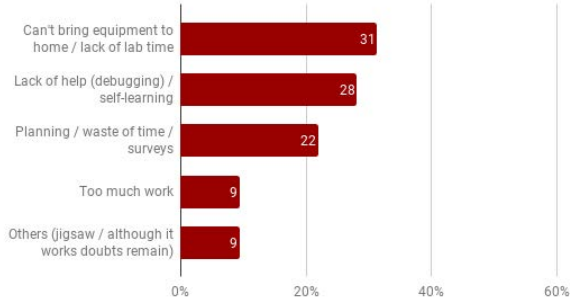
The results of the third survey are shown in Fig.11.It was conducted after finishing the project and before defending it in front of the teachers. As in the previous surveys, working in a real and useful project is the most appreciate characteristic of the course, claimed for about 40% of the students (see Fig. 11a). Furthermore, the topic and technologies involved in the project were claimed by 16% of students. Self-learning is the second one with 22% of votes, but there are more students (28%) who think that self-learning was really the worst of the course (see Fig. 11b). This was only slightly outnumbered by the idea of not being able to bring the equipment to home or not enough lab time. Another important group of students (22%) think that the planning was not good or some activities made them waste time, like surveys. Surprisingly, only a few students (9%) thought that it was too much work to cope with.

B. Teacher perception

From our point of view, students were very reluctant to read the documentation we provided with. In many cases, when they were solving an exercise, they simply put together several examples without adjusting them to their own problem. They abuse the use of "trial and error", and they don't want to use any methodology to debug their codes.



(a) Best



(b) Worst

Fig. 11. Student perception after finishing the project

Furthermore, students had serious difficulties to understand the way Lua works, based on events. They keep trying to write functions sequentially, thinking wrongly that until one function is not completely finished, the next it is not going to be executed.

It is also very difficult to make them follow written instructions properly. We provided exhaustive and precise instruction for each document or code they had to hand in, including the format and the rubric for evaluation. However, they fail following simple rules, even when they know they are going to be evaluated based on these rules.

By the way, we have found some practical difficulties in evaluating Node-RED flows designed by the students. When you have 40 individual solutions proposed by students and presented as exported flows in JSON format, you have a tough work ahead to test them. You have to manually import every flow in your Node-RED programming tool, evaluate the design and then the functional aspects. We have found a very practical solution for next year: designing a Node-RED flow to automatically perform the functional testing of the student's designs. We can test the answer of the student design and store on a collection in the database the results for every student assignment, making easier the evaluation process.

C. Required Improvements

It is clear that the students really like the project and this, along with teamwork, encourages them to follow the course. However, some adjustment is required to improve their experience and the quality of the learning (the project). First, they need specific material to learn how to debug systematically a program (or system). More progressive exercises for each technology have to be introduced previous to work directly in the project, especially for Lua. We should control better their individual progress in a week term basis. To do that we are planning to use an individual diary, where they will have to write down the tasks they work on and the hours used.

Another important issue we should address is the problem of bringing to home the prototype components. This year we did not allow them to do it mainly because, in our opinion, they had another work to do at home. They had to read the documentation we provided, to plan the hardware/software architecture, to design the functions, to generate the asked documentation, etc. In other words, they had to think before doing it. However, in their way of working (trial and error), those matters were a waste of time. There were also other reasons, such as preventing the situation of not being able to work in the lab because they forgot to bring the equipment back. Furthermore, if they really thought they need it at home, why did not buy it if it cost about 5 euros? We think that this complaint was more a self-excuse than a real problem. The easiest solution would be to let them bring the material to home but we do not think that it going really to help them. We better have to find a way to reinforce the task of planning and thinking ahead.

We think that utilizing open-hardware and open-software was a good decision and students appreciated it. However, taking into account that our students have serious problems with Lua, when using it was intended to help them in programming, we are considering to shift to a more traditional way of programming using C through Arduino environment. They are used to these tools and it may be easier for them.

Despite all difficulties, we think that PBL is the better way of confronting the challenge of promoting self-learning and boosting motivation. We will need several cycles to adjust the planning and small details of the methodology, but we think we are in the good way.

V. Conclusion

In the continuous search for improving didactic methodologies, we observed that the interest shown by Engineering students in working on real and practical projects is a great opportunity to engage them in our courses. In fact, we started some time ago introducing more and more fancy and practical laboratory exercises every year. Finally, we cross this point of not return into the PBL approach.

Setting up the new course design has been a challenging task. We have confronted the students' reluctance to face their learning process autonomously. This is a skill they need to acquire, but initially, they can feel uncomfortable with the new situation. Above all, we are satisfied with the initial results obtained.

We have observed a great positive impact on the student satisfaction and motivation. Tuning the courses towards developing real projects on the field, has a large impact on acceptance, learning objectives achievements and motivation

towards the course content. The satisfactory results and the positive response obtained from students leads us to keep on improving the PBL course design in the years to come.

We hope sharing this experience encourages other teachers to put this teaching style into practice and notice its advantages. We truly believe that some of the tools and platforms we have selected and presented in this paper can make a good service as resources for courses close to our subject area.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Professors Miguel Angel Quesada Felice and Antonio Javier Matas Arroyo for their helpful advising on the Urban Garden topic. This work has been supported by project TIN2016-80920-R, from the Spanish Government and by "I Plan Propio Integral de Docencia" and Educational Innovation Project PIE17/085, from Málaga University.

REFERENCES

[1] J. Larmer, J. R. Mergendoller, and S. Boss, *Setting the standard for project based learning: a proven approach to rigorous classroom instruction*, 2015.
[2] (2018, Jan.) NodeMCU DEVKIT v1.0 development board. [Online]. Available: https://github.com/nodemcu/nodemcu-devkit-v1.0
[3] (2018, Jan.) NodeMcu connect things easy. [Online]. Available: http://www.nodemcu.com/index_en.html
[4] (2018, Jan.) NodeMCU documentation. [Online]. Available: https://nodemcu.readthedocs.io/en/master/en
[5] (2018, Jan.) Integrated Development Environment (IDE) for ESP8266. [Online]. Available: https://esp8266.ru/esplorer/
[6] (2018, Jan.) Raspberry Pi. [Online]. Available: https://www.raspberrypi.org
[7] (2018, Jan.) Node-RED. [Online]. Available: https://nodered.org/
[8] (2018, Jan.) Eclipse mosquitto. [Online]. Available: https://mosquitto.org
[9] (2018, Jan.) MQTT protocol. [Online]. Available: https://mqtt.org
[10] (2018, Jan.) JSON lightweight data-interchange format. [Online]. Available: https://www.json.org/
[11] (2018, Jan.) Node-RED dashboard module. [Online]. Available: https://github.com/node-red/node-red-dashboard
[12] (2018, Jan.) Welcome to the MongoDB Docs. [Online]. Available: https://docs.mongodb.com/
[13] M. Valero and J. Domingo, *Técnicas de Aprendizaje Cooperativo y Aprendizaje Basado en Proyectos*, 2017.
[14] R. M. Felder, "We never said it would be easy," *Chem. Engr. Education*, vol. 29, no. 1, pp. 32–33, 1995.

A hands-on course for introducing freshmen for Electrical Engineering

Alvaro Giusto
Facultad de Ingeniería
Universidad de la República
Montevideo, Uruguay
alvaro@fing.edu.uy

***Abstract*—This work describes the experience 2013-2017 of the course Tallerine, a hands-on freshmen course of the Electrical Engineering program of the Universidad de la República, Uruguay. Its objectives include introducing Engineering and the degree program to the students, facilitate their socialization, and promote teamwork and the acquisition of communication skills. This paper summarily describes the experience with an emphasis on the methodological point of view and a first evaluation on its impact on the program.**

Keywords—hands-on freshmen course. project-based learning. electronic projects.

I. INTRODUCTION

Uruguay faces a strong scarcity of Sciences and Engineering graduates, in all areas and levels, which constitutes a bottle-neck for the country plans aiming to develop the production, the culture and the knowledge. This scenario is not, of course, exclusive of Uruguay, [1]. Uruguay graduates 400 engineers each year, equivalent to a graduate per 8000 people. This figure is sensibly inferior to the region's rates (6700 for Argentina, 6000 for Brazil, 4500 for Chile and Mexico) and very inferior to the rates in developed countries, near to 2000. Engineers' and technicians' unemployment is zero and the demand is often unsatisfied with adverse economical and social consequences.

A distinctive characteristic of the Uruguayan educative system is the absence of formal limitations to the access to the public universitary system in most areas, including Sciences and Engineering. Any student completing the secondary cycle is free to access the public University. However, the number of freshmen students of Engineering almost does not increase and the indices of evasion are quite high. The freshmen feminine population is about 20% evidencing a strong opportunity to increase the admission and diminish the genre discrimination by trying to change the existent cultural bias.

The EE program nominally lasts 5 years and has a generalist, credit-based, flexible curriculum. It accomodates several professional lines in EE (telecommunications, power systems, electronics, signal processing, etc.).

The program has received twice the official Mercosur accreditation in 2006 and 2011 and is currently on a new accreditation process. Background on Physics and Mathematics is mostly concentrated in first 4 semesters, common for most of the engineering programs. Until 2013, the organization of the program basically delayed the first technological contents to the 5th semester, delaying also the first project-based learning activities. The whole scenario resulted in:

- a scarce freshmen visibility of the EE program, among all the Engineering programs;
- serious difficulties with student motivation, social integration and evasion;
- number of freshmen EE students descending from 240 to 120 in seven years.

Freshmen students face a quite rude scenario: massive classes and a social environment very different from the previous one often implying a change of residence. Most of them experience also serious academic difficulties with a secondary underground not fully suitable for universitary studies. This situation motivated the offer of the freshmen course Tallerine by the first time in 2013. Tallerine (acronym of Introduction to the Electrical Engineering Workshop and also a pun in Spanish) is an active learning activity where the students develop team projects in several EE areas. The main goals are:

- motivate the students,
- estimulate their creativity;
- integrate socially the students;,
- that the students identify themselves with the University and the program,
- let the students know the objects, topics, methodologies and actors of the EE program.

The methodology includes team work, the offering of five different, ludic, projects or challenges to be chosen by the students, communication activities, etc. The projects offered in the period, more than 15, included applications in audio and image processing, analogical and digital electronics, energy, control, robotics, etc.

The results are very positive. The students perception on the course, very good and sustained along these years, is similar to the results of the first year, documented in [2]. Later, the school performed an evaluation, summarized in section III of this paper, of the impact of the course on the students performance along the EE program.

The paper is organized as follows. Section II describes the methodology of Tallerine including a brief description of main projects. Section III relates the 2013-2017 experiencei ncluding the main results of the evaluation of the impact of the course on the students performance. Section IV wraps up the paper with some concluding remarks.

II. METHODOLOGY

The total group of EE freshmen is about 150 students. Five independent tracks are offered to them, each one of 30-36

places. The students in each track are organized in work teams of 4 to 6 students. The teams work on the same project independently along the 15 weeks of the semester.

Several (usually five each year) EE projects are offered, one by track, whose main attributes are: imply the building of a prototype; are representative of the main applications of EE and have ludic and motivating aspects.

The projects are exposed in a final public event, and by the elaboration and publication of a short video. The videos of the experience 2013-2017 can be seen at [11]. Some of them are included in references below.

The students work in interaction with teachers and with EE students that play the role of teacher-assistants (T.A.) who participate in the experience voluntarily. The interaction with the T.A. (young students like them, but with some experience with the school and the program) is a good stimulus for all of them.

The course schedule includes some initial classes, introductory to the basic objects to be manipulated (basic electronic components, programming, electronic devices and tools, etc.) and a schedule of intermediate deliverables. The grading is individual although, of course, take into account the team performance. It is based on the deliverables (written reports, presentation, prototype), class observations and co-evaluation.

Key tools of the methodology are discussed next.

Motivation. It is the main objective to achieve and also the main educative tool. Motivation was closely monitored by the daily teacher-student contact and through surveys specially designed with this objective. Motivation was also the main tool to organize the team of teachers and voluntary teacher-assistants.

Team work. Our previous experience with active learning in Engineering, see e.g. [3,4] suggested a number of 6 students per team. It provides redundancy, enough work force to achieve some interesting technical goals, and the basic cell for social interaction and communication. The fair distribution of tasks between the team was observed by the teachers in each instance and by the co-evaluation, described later.

Challenging projects. The proposed projects were frankly challenging for the students, given their previous background. This fact is strongly motivating when properly handled. The lack of background was circumvented by several teaching tools: introductory material, tutorial exercises, black boxes in electronics and software, etc. The objetive was *to work with* these devices instead of *to analyze* them or *to model* them.

Closely controlled course. Teachers had to be careful with several details potentially able to frustrate students along the course. One aspect that deserved a lot of attention was the level of difficulty of the different tasks in order to be reached by the students with a heterogeneous and partially unknown previous background. The projects and the tools provided were thought in a modular way in order to tune their extension and difficulty during the semester. Some projects were extended because primary objectives were surprisingly reached very fast.

Technical communication. The student teams were asked to present their advances at least twice, with computer presentations and prototype demonstrations. These instances provided feedback about the ongoing projects for students and teachers. Written reports were also asked and the elaboration of a video per team. The videos had two guidelines: a hard limit of 5 minutes and the warning that they will be public on Internet. Considering that the elaboration of the video was the last activity of the semester, they were advised to relax ad enjoy the experience to publish their work on the net.

Tallerine communication. During the course, two on line tools are used. The University education site (https://eva.fing.edu.uy/course/view.php?id=405) was employed for formal communication and news, and also a Facebook as a repository of pictures, videos and a way to maintain the students motivation.

Coevaluation. At the middle and the final of the semester a mandatory on line form has to be filled by the students. The questions asked the student about the punctuality, the attitude, creativity and the respect for the team agreements of each member of the team. These data were processed very fast and the feedback, student by student, was put in knowledge of the teachers. The average rate received from their colleagues was also communicated to each student. This tool was very helpful to encourage the right attitudes in a work force and prevent an unfair distribution of tasks and responsibilities inside the student teams. The co-evaluation form was designed along references [5,6,12]. The co-evaluation was not done in teams with less than 4 members.

The projects offered in the period were:
Analogic sinthesizer ("Sintetizador"). Each team must build a electronic musical instrument, departing from schematic diagrams and basic principles of different modules: oscillators, amplifiers, filters, modulators, etc.. Each team had to:
design the layout and build the printed circuit board (PCB);
build each circuit (to cut and drill the PCB, welding the components);
test and debug each circuit;
synthesize a sound chosen by the team (e.g. the sound of a motorcycle, an alarm, etc.).
Finally, each team had to design and build a sound controller, e.g. a controllable device that helps to play the sound. The controllers built were different devices ranging from an optical harp to a kind of a guitar based on a linear resistance. We discovered the art skills of several of our students.

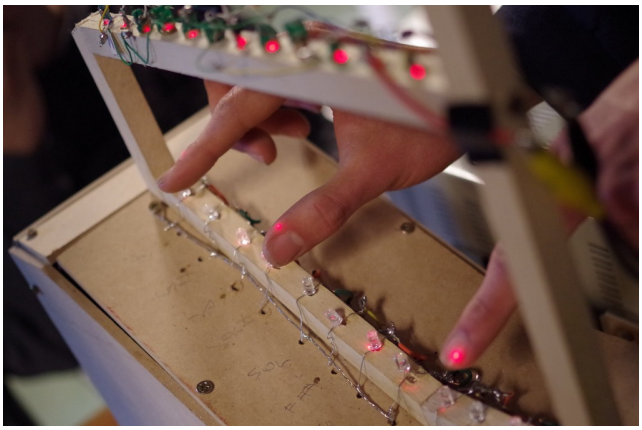


Figure 1:" The harp", 2013: an instance of Sintetizador project.

Othello game ("Otelo"): Each team had to program a small micro controller Arduino in order to manage a led matrix, communicate with a similar device and implement a strategy to play the Othello game. The harware (Arduino card and a PCB with the led matrix and associated circuitry) was supplied. The students work was entirely on the game strategy and the programming. The routines provided by the teachers implement the basic manipulation of the led matrix, the PC-Arduino communication and a routine that returns the possible places for the next move.
Teachers provided a first benchmark player that simply chose the moves at random. A second benchmark, more competitive, was provided later. Students investigated on Internet and designed game strategies to play against the teachers' players and other opponents. The project ended with a competition between the students teams and the teachers' strategy.

Cell phones with Android ("Android"): the teams implemented routines for the management of the basic peripherals of a smart phone (camera, display, audio, device attitude) to play with them and implement basic games. The teams began making programs to implement different games (bouncing balls, mazes, etc.) and signal processing routines. The final projects, at the end of the semester, include an interactive maze (the user can draw a maze on a paper, take a picture and use it to play on the cell phone), programs that directly upload pictures on Internet and several kind of games based on the attitude sensor and the tactile display.
This project was the most challenging from the technical standpoint. Some teaching procedures and materials were later revised in order to turn easier the first approach for students lacking previous experience on programming.

Solar energy system ("Solar"): the teams had to build a battery charger fed by a photovoltaic panel.A 6V battery and a 17V, 12W photovoltaic panel was provided, as well a schematic diagram of a linear voltage regulator that can charge the battery from the solar energy. The project included an initial set of very interesting workshops about renewable energy, the design and construction of the PCB and the testing of the final circuit. This project, the most technically simple, was as effective as any other to keep the students motivation all along the project.

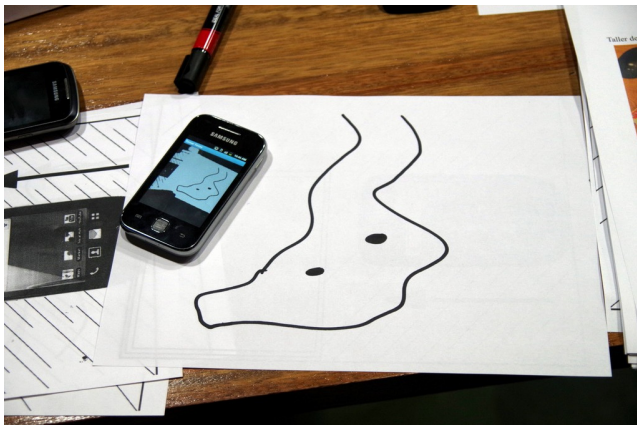


Figure 2: " The maze", project Android 2015.

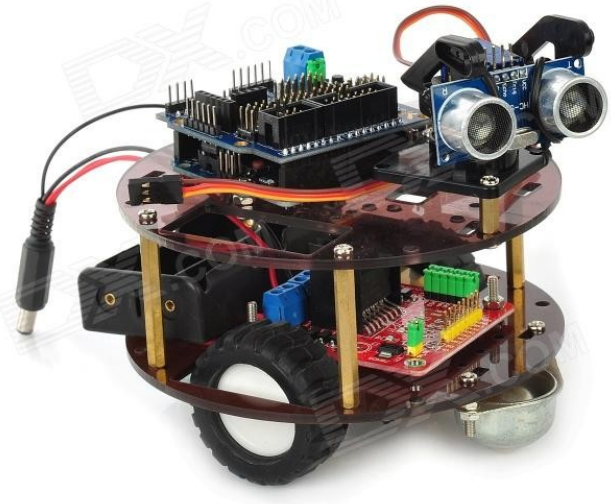


Figure 3: An image of the robots used for Tallerine Robotico, 2015.

Robotic ("Robotico"): an autonomous robot provided with two driven wheels, infrared and proximity sensors is to be programmed by the students in order to follow some floor references and respect certain restrictions. The robots are equipped with an Arduino micro-controller and communications cards Xbee. The final competition one year consisted in driving the robot by a small city designed on the floor; other years was a sumo game.

Simon game ("Simon"): Students implemented the classical game with an electronic plaque of configurable logic, the Terasic's DE0. The blocks of logic were very simple and the introduction of the students to this technology was made very efficiently with a set of three tutorials. The implemented game was based on three colors and switches, instead of the four of the classic game. A VGA output allows to observe the game on a computer monitor.

Leds on wheels ("Leds sobre ruedas"): The challenge was the construction of a display based on the persistence of vision (POV) with an array of leds mounted on a beam of a bicycle wheel. The control was done with an Arduino micro-controller and some additional basic digital electronics.

Digital audio effects ("Efectos Digitales de audio"): Several classical audio effects (Distortion, Delay, Flanger, etc.) were implemented by using free hardware y software (Linux/GNU, Puredata, Arduino, Raspberry, etc.) . See, for instance, video [10].

III. THE 2013-2017 EXPERIENCE

The first experience was, *a priori*, plenty of uncertainty. The teachers had a significant experience about teaching students with three or four years of university education, see [13]. There was no previous experience of our team on teaching freshmen with the significant differences in maturity, background and motivation. There was no previous experience in the program with a teaching methodology aimed to build

devices and prototypes without a very solid background on Physics, Math and modeling skills.
Despite of these uncertainties, the offer was not intended to be a pilot program for a reduced target: Tallerine was offered, although not mandatory, to the complete generation of EE freshmen students: about 150.
The main tool to cope with the uncertainty was the close monitoring of the learning process and the pre-design of the projects in a modular way. Projects were conceived in such a way that they can be enlarged or simplified in accordance to the students response.
Each student chose his/her first and second preferred project. Vacancies were solved taking the students preferences into account and trying to balance the five projects each with about 30 students.
The course began with a first magistral class (the unique, by the way) to welcome the students, explain the methodology, the schedule and the basic rules. Its main objective was to be sure that they understand the basic fact that Tallerine is a course *to do things* and *not to listen.* The message was explicit and completely in line with the previous publicity. During the first class a survey was done in order to collect some data and measure the initial enthusiasm with the proposal. On the 7th week of the semester the survey asking directly for the student enthusiasm with the course was repeated. The results, broken down by project, are shown in Fig. 4.

Fig. 4 shows that the project Solar was very effective in keeping (and increasing) the student motivation the first part of the semester. Projects Otello and Android show that several students lose part of their initial enthusiasm. In particular, in these weeks and projects the students made their first experiences with programming, compiling and debugging, some defiant tasks that yield their results later. It was very important to get timely these data and share it with the teachers team.

The perception of the students about the course is very positive. The results of a polley done at the final of the semester was first published in reference [2] and it had little variations on the complete period 2013-2017.

The projects were presented in a public event at the final of the semester. There were demonstration of musical instruments, photovoltaic battery chargers, games and application on Android devices, Otelo competitions, implementation of Simon games in a quite festive event.

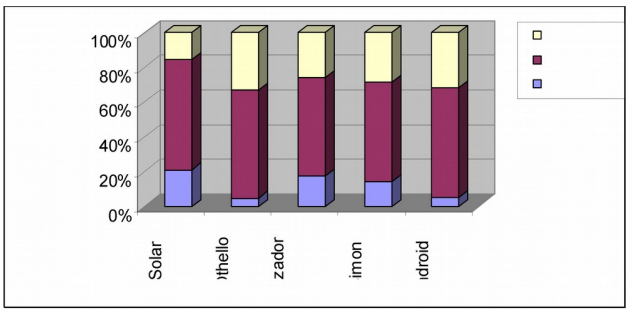


Figure 4: Intermediate survey, by project. Left to right: Solar, Othello, Sintetizador, Simon and Android. Skyblue: students who feel more enthusiastic than initially; violet: students with the same enthusiasm; white: students with less enthusiasm.

The videos elaborated by the students have shown to be an excellent tool for socializing, describing the main ideas and the project. Is also a very valuable way to freely express the students opinion and mood about the course.

The videos [7-9] are particularly descriptive of the course methodology, as seen by the students. The reader can look all the videos on Youtube [11]. They are spoken in Spanish, but most of the message is not verbal.

In 2015 Unidad de Enseñanza de la Facultad de Ingenieria (Education Department of the Engineering School) evaluated the 2013-2014 experience of Tallerine. A description of the results follows. A broader study reaching year 2017 is currently in progress.

First, it was evaluated the student performance on the other first semester courses (Calculus with one variable (16 credits), Geometry and Linear Algebra (9 credits) and a first introductory course of Physics (10 credits)) for several students populations: Computer Sciences students, Mechanical Engineering students, Electrical Engineering students having done or not Tallerine. The performance is computed by adding the credits won by each student. The study ranges 4 years from 2011 to 2014. Tallerine was offered since 2013.

Table I list the students performance of 2013+2014 generations of EE students having donde Tallerine, taking as control groups the students of Computer Science, Mechanical and EE not doing Tallerine. For each program the total number of students, N, the median and the average of the credits won are listed. Notice that the median provides little information since the possible values are {0,9,10,16} and the respective additions. A zero median in Table I tells us that half the students has won zero credits for the corresponding program.

Second, the focus is put exclusively on the EE students in the period 2011-2014. The performance of the students having done Tallerine is compared with the EE students without Tallerine.

Table II lists the results of the same analysis taking the EE students generations 2011 and 2012 as control group. It is clear from both tables the correlation between the performance on these math and physics courses and the fact of having done Tallerine.

The impact of Tallerine on the evasion was also measured. The number of students with no activity the year following the first semester was obtained for several engineering programs. The results for EE were disclosed in Table III regarding the inclusion or not of Tallerine in the first semester.

TABLE I. CREDITS WON BY 2013+2014 STUDENTS FOR COMPUTER, MECHANICAL AND ELECTRICAL ENGINEERING

Program	Computer Science	Mechanical Eng.	EE w/o Tallerine	EE with Tallerine
N	1047	225	110	166
median	0	0	0	9
average	5.9	10.6	5.8	12.9

TABLE II. CREDITS WON BY EE STUDENTS .

Program	EE 2011-12	EE 2013-14	EE w/o Tallerine 2013-14	EE w Tallerine 2013-14
N	204	276	110	166
median	0	0	0	9
average	8.6	10.0	5.8	12.9

Table III shows that EE is the program with less inactivity of the three programs considered and that all the Tallerine students remain active the year after the course.

In order to avoid a possible bias due to differences between different programs, four generations of EE students were compared, see Table IV.

No student that realized Tallerine in 2013 or 2014 abandoned the program the year after the first semester.

Results in Table IV question us *Is Tallerine providing something useful, valuable, to students*? Or, merely, *the active students do the course and the inactive ones not*?

In order to answer this questions, the 10% of the 2013-14 EE students was interviewed by phone. The aspects mentioned by the students were the following:

- Tallerine allowed them to integrate study teams that went beyond Tallerine and improve their study strategies for other courses.
- Tallerine helped them to gain insight about their vocation, being this EE or not.
- Tallerine was a concrete meeting with the professional activity.
- The students highly valuates that the course is offered in the first semester and ask other programs to include a similar activity.

The Facultad de Ingeniería has done a deep discussion about the teaching strategies to face the difficulties at the beginning of the different engineering programs. The results of Tallerine, along other active learning courses in Physics [14], provided a valuable experience that paved the way of a change of teaching strategies prioritizing this kind of activities in first semesters. Currently, Computer Science and Chemical Engineering are designing freshmen curses with similarities with Tallerine.

TABLE III. INACTIVE STUDENTS THE YEAR AFTER THE FIRST SEMESTER, 2013-2014.

Program	Mech. Eng. 2013-14	Comp. Science 2013-14	EE 2013-14	EE w/o Tallerine 2013-14	EE w. Tallerine 2013-14
N	225	1047	276	110	166
Inactives	34	130	26	26	0
%	15.1	12.4	9.4	23.6	0

TABLE IV. INACTIVE EE STUDENTS THE YEAR AFTER THE FIRST SEMESTER, 2011-2014.

	EE 2011-12	EE 2013-14	EE w/o Tallerine 2013-14	EE w. Tallerine 2013-14
N	336	276	110	166
Inactives	32	26	26	0
%	9.5	9.4	23.6	0

IV. CONCLUSIONS

This document is a brief description of the experience with Tallerine, a hands-on freshmen course for motivating and introducing students to the EE program. The course has shown to be very successful to integrate the students between them and to improve their study strategies for the Electrical Engineering program.

Some key aspects of the teaching methodology were identified as the main tools for the results obtained: teachers motivation and rapport, quick feedback, suitable communication, close monitoring and the employment of suitable surveys for measure students motivation and team performance. The documentation of the projects via the elaboration of short, public, videos was a true finding very helpful, in addition, for course and program communication.

The academic performance of the students on the first courses of the program has improved and the inactivity indices in first semesters has drastically diminished. No Tallerine student was found to be inactive the year after the course. Student inteviews by phone pointed several valuable outcomes of Tallerine regarding social integration, program insight and study teams.

REFERENCES

[1] Knight, D. W., Carlson, L. E., Sullivan, J. F. (2007) "Improving Engineering Student Retention through Hands-On, Team Based, First-Year Design Projects", 31 st International Conference on Research in Engineerin g Education, June 2007, Honolulu, HI.

[2] Giusto, A., "Tallerine: a hands-on for motivating freshmen for Electrical Engineering", Active Learning in Engineering Education Workshop, Caxias do Sul, Brazil, Jan. 2014

[3] Belzarena, P., Giusto, A. & Randall, G., "Experiencias de estímulo a la creatividad en la carrera de Ingeniería" , Congreso de Educación en Ingeniería, XXI. Santiago de Chile - 3-6, oct. 2007.

[4] Belzarena, P., Eirea, G., Giusto, A. & Monzón, P., "Taller Encararé Creativity and Entrepreneurship in Engineering" Active Learning in Engineering Education Workshop, 10th. Proceedings. Santiago de Chile, Jan. 10-12, 2011, page 17--21 – 2011.

[5] Alonso Tapia, J. Motivación y estrategias de aprendizaje. Principios para su mejora en alumnos universitarios; en

García,A.; Muñoz-Repiso,V. (coord.) Didáctica Universitaria Ed. La Muralla, 2001.

[6] Míguez, M. & Loureiro, S. (2012) *Motivación y estrategias de aprendizaje*, UEFI, Facultad de Ingeniería: http://iie.fing.edu.uy/cursos/mod/resource/view.php?id=9760

[7] Massonier et al (2013), Team "Simon Ma 1": http://www.youtube.com/watch?v=dtK1mxow4MA

[8] Garcia, G. et al (2013), Team "Simon J2": http://www.youtube.com/watch?v=iYTbh-N6VMo

[9] Hernandez, G. et al (2013), Team "Solar G1": http://www.youtube.com/watch?v=QZR49Zz5pXU

[10] Padilla, S. et al (2017), Team 'Pedalera de efctos para voz", efectos digitales de Audio, https://www.youtube.com/watch?v=s7vp3nb8PM0

[11] TallerineVideos (2013-17). Search "Tallerine" in Youtube.

[12] Míguez, M. & Loureiro, S. (2012) *El trabajo colaborativo como estrategia de enseñanza y de aprendizaje*, UEFI, Facultad de Ingeniería: http://iie.fing.edu.uy/cursos/mod/resource/view.php?id=9760

[13] Oliver, J. P.; Haim, F., (2009) *Lab at Home: Hardware Kits for a Digital Design Lab*, IEEE Transactions on Education, v. 52 nro 1 , p. 46-51, 2009.

[14] Auyuanet, A. et al, *Fisicactiva:applying active learning strategies to a large engineering lecture,* European Journal of Engineering Education, March. 2017.

[15] J. E. Froyd, P. C. Wankat and K. A. Smith, "Five Major Shifts in 100 Years of Engineering Education," Proceedings of the IEEE, vol. 100, pp. 1344-1360, 2012

SESIÓN III.B: SISTEMAS DIGITALES 1

Generación de cronogramas a medida en Sistemas Digitales

Javier Roca Piera
Departamento de Informática
Universidad de Almería
Carretera de Sacramento S/N 04120 Almería, España
jroca@ual.es

Toni Schaarschmidt
Departamento de Informática
Universidad de Almería
Carretera de Sacramento S/N 04120 Almería, España
Toni.Schaarschmidt@hotmail.de

***Resumen*—Los diagramas de tiempos son una herramienta habitual utilizada en el aprendizaje de sistemas digitales. La relación temporal existente entre varias señales, expresada de forma gráfica, nos facilita la comprensión de la forma de actuar de aquellos dispositivos que son constitutivos del cualquier sistema digital y por extensión de cualquier sistema computacional. Ejemplificar el comportamiento de un circuito digital necesita cronogramas funcionales adecuados que pongan de manifiesto todas las posibilidades que pueden darse y que necesitan ser mostradas para una correcta comprensión del funcionamiento de los distintos dispositivos. Se presenta en este trabajo una herramienta que posibilita la generación de cronogramas de forma sencilla con fines didácticos para el aprendizaje del comportamiento de los circuitos digitales.**

Keywords—tecnología de computadores; simulación digital; cronogramas; docencia en grado

I. INTRODUCCIÓN

El aprendizaje de conceptos asociados a asignaturas del campo de los sistemas digitales, donde el análisis del comportamiento de dispositivos incluidos en esta área, requiere constantemente la utilización de señales lógicas, las cuales deben modificar su valor de forma cronológica sin la obligación de mantener un patrón determinado. La generación de estas señales de esta forma nos asegura plantear un conjunto flexible de supuestos que abarquen las distintas posibilidades que se pueden presentar a la entrada de un circuito digital.

La enseñanza de tales materias obliga a la generación continua de cronogramas que muestren la casuística a la que tendrán que responder los distintos circuitos digitales. Siendo esta generación simple desde el punto de vista conceptual, se ocasionan no pocos inconvenientes cuando se quiere implementar su realización de forma digital, dado que no existen aplicaciones que faciliten tal tarea.

Por otra parte, la elaboración de relaciones de ejercicios en los cuales se propongan múltiples casos que pueden darse a la entrada de un circuito digital, se hace una tarea tediosa únicamente por el inconveniente de no poder generar de forma fácil diagramas de tiempos que sean de nuestro interés y que sabemos pueden ser de utilidad para presentarlos en la resolución de ejercicios por parte de los estudiantes.

Los simuladores del comportamiento de circuitos digitales, utilizados de forma general para el aprendizaje de estas materias como PSpice [1] o Logic Works [2] son indiscutibles para un correcto aprendizaje. Su utilidad se pone de manifiesto por la facilidad con la que podemos incorporar dispositivos a nuestro panel gráfico. Así mismo, estos programas nos permiten, además de otras múltiples posibilidades, establecer las líneas de conexión necesarias y analizar el comportamiento del circuito de forma precisa. Estos programas nos muestran las señales que se obtienen en la salida del circuito, tras incorporar a su entrada un determinado panel de señales representativas de los valores digitales que toman las distintas variables que forman parte de la función o funciones. Así mismo nos ofrecen valoraciones temporales de la respuesta del circuito desarrollado.

Estos programas nos permiten abordar proyectos académicos con distintos niveles de complejidad, desde los simples con un pequeño número de dispositivos, a otros que se acercan significativamente a los proyectos profesionales. Los valores de estas variables se ejemplifican en los simuladores por medio de interruptores binarios, si bien se suele disponer para los casos que requieren sincronismo, de una señal de reloj en la que se puede determinar su periodo y ciclo eficaz, sin embargo no tienen como objetivo prioritario facilitar la disposición de cronogramas flexibles y a medida en las entradas de los distintos dispositivos seleccionados, ni ofrecerlos como salida de una forma versátil para su presentación gráfica.

Niveles iniciales de aprendizaje en este campo requieren una comprensión detallada del comportamiento digital de los elementos fundamentales como puertas y biestables de una forma particularizada elemento por elemento. Esto nos permitirá posteriormente analizar agrupaciones cada vez más complejas de los mismos. Asignaturas como Estructura y Tecnología de Computadores que se imparte en el primer curso de Ingeniería Informática, en donde se adquieren desde los conocimientos básicos de sistemas digitales hasta los conceptos de organización de computadores y que son base para construir un conocimiento avanzado en Arquitectura de Computadores, necesitan estrategias de aprendizaje que faciliten y afiancen el conocimiento que deben tener los estudiantes de cara a poder presentarles escenarios más complejos.

La responsabilidad con que el alumno debe abordar el aprendizaje de estas asignaturas está basada fundamentalmente en su motivación y ésta, como pieza fundamental, en la adecuada estrategia que el profesor debe llevar en todo el proceso. Es necesario planificar distintos tipos de actividades que fomenten su participación activa con objeto de mantener el interés del alumno en el aprendizaje de determinados conceptos, que no siempre considera de utilidad para una formación práctica en un determinado campo profesional.

El esfuerzo que vamos a demandar del estudiante solo es posible obtenerlo si éste confía en que el camino que hemos marcado en la asignatura es no solo rentable, sino realmente formativo y es ahí donde la generación de herramientas adecuadas en conjunción con una buena labor de tutoría adquiere un papel relevante [3] [4]. Otros proyectos metodológicos fomentan la utilización de tecnologías interactivas en el aula, con el ánimo de facilitar al profesor el conocimiento adquirido por los estudiantes en la propia sesión de clase presencial [5].

Es en estos niveles iniciales de aprendizaje donde las exposiciones realizadas en clase y la presentación de ejercicios, planteados como actividad para realizar de forma autónoma o grupal por los estudiantes, echan en falta una forma cómoda de generar señales digitales a medida, las cuales puedan servir como variables booleanas que evolucionan en el tiempo o como señales de reloj para aquellos elementos digitales que requieren sincronismo. Tenemos presente que en los inicios de un primer curso se debe prestar más atención a la compresión de conceptos que al manejo de herramientas. Desde este punto de vista la utilización de aplicaciones que visualicen de forma gráfica lo diseñado y sean cómodas de usar facilitan en mayor medida la consecución de este objetivo [6] [7]. Su utilización favorece mucho más el aprendizaje de conceptos, que si tuviera el alumno que focalizar su atención en manejar herramientas más complejas, las cuales se incorporarán una vez avanzado el curso; todo ello sin perder de vista el grado en que debe ser guiado [8], cuestión ésta clave así mismo, para una correcta evolución del aprendizaje.

La experiencia nos enseña que una tarea simple, que de forma manual en pizarra o papel no plantea ninguna dificultad, como la de generar cronogramas, se torna tediosa cuando se quiere realizar sobre un documento o aplicación digital, constatando algo no deseable como docentes, que las tareas fáciles a veces nos llevan mucho tiempo. Por otra parte, el disponer de una señal binaria cronológicamente variable en formato digital, nos ofrece la posibilidad de utilizarla como señal adaptada para ser manejada por otras etapas en las que se pueda abordar la compresión de los elementos fundamentales mencionados anteriormente.

Ejemplificar el comportamiento de un circuito digital necesita cronogramas funcionales adecuados que pongan de manifiesto todas las posibilidades que pueden darse y que necesitan ser mostradas para una correcta comprensión del funcionamiento de los distintos dispositivos.

Es una necesidad continua generar cronogramas para proponer casos y supuestos que sirvan para analizar el comportamiento de sistemas digitales.

La ausencia de una herramienta específica que sirva de apoyo tanto a profesores de éste área que en su clase quieran mostrar de forma clara el funcionamiento de determinados circuitos digitales, como a alumnos que en su tareas autónoma de aprendizaje tengan a disposición una forma de comprobar lo explicado en clase, es lo que nos motivó a construir esta aplicación.

II. ENTORNO DE DISEÑO

Uno de los factores fundamentales que se plantearon inicialmente cuando se constató la necesidad de una herramienta que solventara las dificultades que se tenían, fue asegurar un marco de diseño claramente sencillo de utilizar. Además se tenía conciencia de que lo que buscábamos solventar no podría tener un largo recorrido de ampliación, dado que el incremento de potencialidad está claramente limitado por las aplicaciones utilizadas masivamente como simuladores en el campo de la enseñanza de los sistemas digitales, mencionadas anteriormente. Nuestro objetivo no requería grandes inversiones, sino conceptos claros que nos ofrecieran como salida cronogramas en los que la flexibilidad de su definición fuera el factor clave.

La aplicación desarrollada corre sobre un entorno Excel en el que se han parametrizado el número máximo de señales, así como el número de pulsos máximo a representar, los cuales se definen por filas y columnas respectivamente. Se consideró que ofrecer la posibilidad de representar 16 señales como máximo era más que suficiente para nuestros intereses. De igual forma la representación de hasta 40 pulsos nos posibilita analizar cualquier situación que queramos plantear en nuestro esfuerzo docente. La asignación de valores a las variables de entrada se realiza de forma natural colocando un 0 o un 1 en el periodo de tiempo que queremos que la señal esté a un valor bajo o alto, respectivamente.

De igual forma el periodo de tiempo asignado a una columna puede ser subdividido con el ánimo de flexibilizar la forma de onda que queremos construir. Esto no da una gran versatilidad a la hora de configurar la señal de entrada. Cada espacio temporal puede ser subdividido en 6 subespacios, los cuales pueden tomar los valores que asignemos 0 o 1, de forma similar a como lo hacemos con todo el espacio correspondiente a la representación del periodo de tiempo asignado a una columna.

En la figura 1 se muestra la generación de dos señales digitales. Una de ellas A, se puede interpretar como la forma clásica de una señal de reloj, como explicaremos más adelante. La otra B, ejemplifica el rango de posibilidades que nos ofrece la aplicación, toda vez que podemos establecer un conjunto amplio de relaciones casuísticas entre ella y la posible señal de reloj.

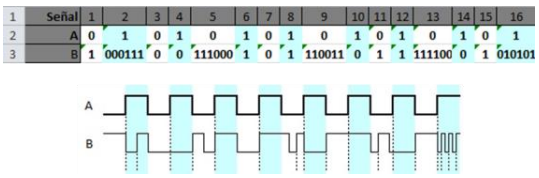


Fig. 1. Asignación de valores a dos variables lógicas

Con el límite de señales y pulsos indicado anteriormente, 16 señales y 40 pulsos, se dispone de un entorno sobre el cual podemos definir un conjunto de señales a nuestra voluntad.

El entorno de diseño se muestra en la figura 2, en la cual podemos visualizar los distintos elementos que nos permiten configurar nuestro cronograma. Por una parte el espacio de filas y columnas Excel donde asignaremos nombre a las distintas señales, así como la evolución de sus valores digitales y por otra un conjunto de "botones" que nos permitirán visualizar la propuesta o propuestas planteadas numéricamente.

Una vez asignados los valores digitales en cada espacio temporal, podemos proceder a representar gráficamente estas señales simplemente pulsando el icono correspondiente "Recalcular y Dibujar". Esto provoca la representación gráfica de los conjuntos de valores asignados previamente, en el orden en que se han definido, fila tras fila.

Tal como se muestra en la figura 2, la posibilidad de resaltar en negrita o con un determinado color las señales que nos interese, ofrece una vistosidad muchas veces necesaria cuando se quiere presentar el comportamiento de los circuitos digitales.

Los botones "señales" y "pulsos" nos permiten incrementar o decrementar el número de señales o el número de pulsos a visualizar. Un "-"delante del nombre asignado a una señal, nos representará la forma complementaria de la misma.

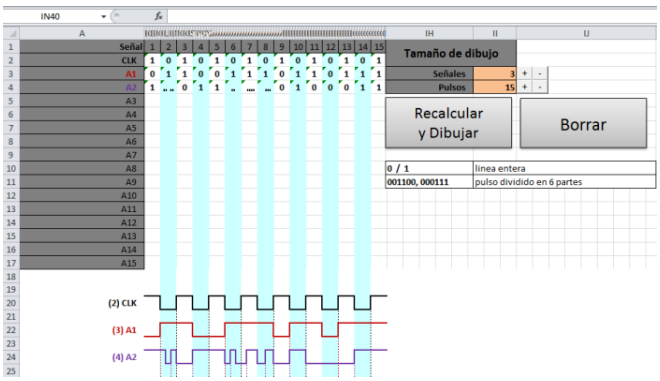


Fig. 2. Entorno de diseño de cronogramas

A. *Lógica de representación gráfica*

Durante la ejecución de "Recalcular y Dibujar", el código convierte cada señal en 6 números. (1 -> 111111, 0->000000 o toma las entradas explícitas de 6 valores, tal como se hayan definido). A continuación la macro coge cada trozo de un pulso y formatea el borde de la celda de este trozo con una línea continua. Si es un 1, formatea el borde de arriba, si es un 0 el borde de abajo.

De igual forma, la macro controla si el valor anterior es distinto del actual, lo cual significa que hay un cambio de señal de 0 a 1 o viceversa. En este caso la macro formatea el borde de la izquierda del trozo con una línea continua o el de la derecha. El resultado es la visualización de una gráfica que con las características numéricas, intensidad y color,definidas previamente, va mostrando su forma gráfica por periodos, con la forma correspondiente al valor o valores asignados en esa columna temporal. De esta forma es muy fácil visualizar la correlación entre valor y forma de onda, para su posible modificación en caso de estar interesados en ello.

Cabe significar que tal como se ha mencionado antes, la representación permite 6 subespacios dentro del periodo asignado a una columna, esto no ofrece multitud de posibilidades a la hora de definir una forma de señal que puede tomar hasta 12 valores en el periodo de una hipotética señal de reloj definida. Esto nos permitiría que la señal cambiara de valor hasta 12 veces dentro de un periodo de reloj.

B. *Entorno de datos y programación*

Este programa usa las funcionalidades del programa "Microsoft Excel 2010" para mostrar la lógica de señales de entrada y salida. En el entorno de Excel tenemos una plataforma familiar para insertar datos fácilmente y representar soluciones gráficamente. Vía el entorno VBA que es implementado en cada producto de Microsoft Office, disponemos de una herramienta potente para calcular expresiones difíciles y manejar trabajos y lógicas complejas mediante la programación de macros.

III. SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE CIRCUITOS COMBINACIONALES

Una vez que se tenía la posibilidad de generar cronogramas de forma fácil a nuestra voluntad, se pensó en potenciar la aplicación con la posibilidad de ofrecer la respuesta de salida de circuitos digitales simples. Desde nuestro punto de vista esto ofrecía también una forma fácil de que los alumnos pudieran comprobar la respuesta de circuitos digitales, que en las primeras fases de su aprendizaje requiere experimentar con distintos casos a fin de afianzar su comprensión. De igual forma, la exposición en clase puede ser más comprensible si acompañamos la exposición del comportamiento de un circuito con la visualización de la salida, tras la definición de señales de entrada.

Con este objetivo, se ha aportado la funcionalidad de establecer relación entre las señales definidas en distintas filas del entorno de diseño. Esto supone incrementar la opción didáctica de la herramienta por medio de ofrecer de forma visual la señal que obtendríamos a la salida de un circuito combinacional o secuencial. Basta con insertar funciones típicas constitutivas de circuitos SSI como puertas lógicas o biestables.

El análisis de circuitos electrónicos, tanto digitales como analógicos lo abordan distintas herramientas de uso generalizado, las cuales están preparadas también para diseñar circuitos a nuestra medida, utilizando módulos existentes en el mercado. Como hemos mencionado anteriormente, PSpice o Logic Works son claros ejemplos de herramientas de gran utilidad para la enseñanza de estas materias y con una potencialidad que permite ejemplificar lo explicado en distintas asignaturas del grado de Informática. Sin embargo, estos programas nos facilitan a nuestro entender, una salida

gráfica con el carácter didáctico deseable para unos primeros niveles de aprendizaje.

Otras herramientas como VerilUOC [6] permiten además chequear la bondad del diseño de un circuito, realizado como tarea por los alumnos, facilitando en gran medida la autoevaluación y trabajo autónomo del estudiante.

En nuestra herramienta, dependiendo del dispositivo digital en el que se quiera visualizar su comportamiento ante señales presentadas a su entrada, el código analiza las señales que hemos definido y escribe los valores de salida en el espacio correspondiente a cada pulso en el espacio de visualización, cumpliendo las reglas lógicas de los elementos Flip-Flop o puerta lógica con el que estemos trabajando. Esta lógica está programada mediante operaciones elementales (suma, multiplicación, *IF then else*, bucles,...) y los comandos internos de Microsoft Excel para acceder a las celdas, sus contenido (valores, texto), sus propiedades (color, fuente), etc.

En cada una de las 6 partes de un pulso, el código analiza las señales actual, anterior y siguiente, calculando a continuación el valor de salida respecto de lógica de Flip-Flop o Puerta Lógica. La macro guarda el valor temporalmente para generar las 6 partes de la salida, por ejemplo 001010. Al final la macro escribe este número en la correspondiente señal de salida y pulso actual del elemento digital que estemos utilizando.

Además del cálculo de valores de salida resultado del comportamiento de Flip-Flops (JK, SR, D) y puertas lógicas (AND, OR, etc.), la herramienta de diseño ofrece como complemento un simulador gráfico que posibilita la visualización de los cronogramas diseñados a medida de forma totalmente libre.

Para iniciar un cálculo se tiene que definir el elemento que se quiere representar. Introducir un texto que empieza con dos "##" abre el formulario para puertas lógicas. De igual forma, si ponemos dos "**" abre el formulario para Flip-Flops.

El siguiente cuadro muestra los distintos parámetros que intervienen en la definición del comportamiento de Puertas Lógicas. En la definición únicamente hay que indicar el tipo de puerta que queremos analizar y las filas del entorno Excel en el que se encuentran las distintas señales que actuarán como entrada de la puerta. Esto a su vez configura el número de entradas que tendrá la misma, sin necesidad de añadir ningún parámetro más.

TABLA1. PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN EL COMPORTAMIENTO DE PUERTAS LÓGICAS

Puertas Lógicas: ## X [t,u,v,w,...]	
##Elemento puerta Lógica **X** Tipo de puerta (AND, OR, NOR, …)	**t, u, v,....** Filas de entradas de la puerta
Las entradas son en forma "+i"	
+ (¿entrada negada?, "+"=NO, "-"=SI) **i** (fila de señal de entrada en Excel [i = fila i en Excel])	

Ejemplo:

##OR[+2;+3;+4;+5;+6] Puerta OR con 5 entradas: la entrada A es la fila 2, la entrada B es la fila 3, la entrada C es la fila 4, la entrada D es la fila 5 y la entrada E es la fila 6. De igual forma aparecen definidas las otras funciones combinacionales de la figura 3.

Como podemos comprobar en esta figura, para obtener la señal de salida correspondiente a un conjunto de valores digitales a la entrada, es necesario indicar la función que queremos (AND, NOR, etc.) precedida de ##. La aplicación interpretará estos caracteres como una función a representar y abrirá una ventana de diálogo (figura 4) para determinar que parámetros intervienen en la función. En este caso los parámetros serán el tipo de función a representar y las variables de entrada, identificadas por las filas en las que se encuentren cada una de las señales que nos interese utilizar. Una selección de las mismas y la pulsación del botón "Crear", dejará la aplicación a expensas del momento en que nosotros queramos visualizar gráficamente el resultado pulsando el botón "Recalcular y Dibujar".

Un botón "Añadir negada" nos posibilita introducir la señal seleccionada de forma complementada. Podremos observar así mismo que tras la pulsación del botón "Crear", la fila en la que iniciamos nuestra propuesta de implementar la función, aparece con los parámetros asignados en la ventana de diálogo.

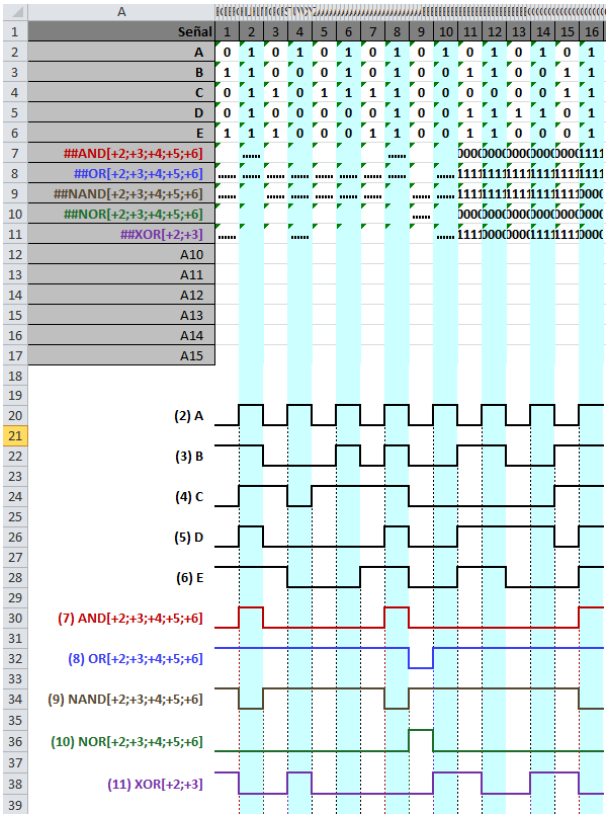


Fig. 3. Representación de funciones combinacionales

Por ejemplo

##AND[+2;+3;+4;+5;+6] indica que se visualizará la función AND de 5 señales, las cuales se encuentran en las filas 2, 3, 4, 5 y 6, no estando ninguna de ellas complementada, ya que en ese caso el número de fila vendría precedido por un signo (-).

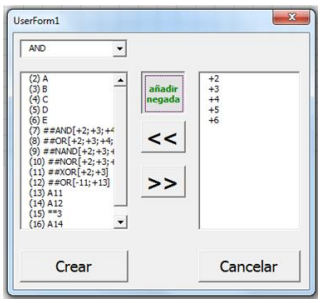


Fig. 4. Ventana de diálogo de una Puerta Lógica

IV. SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE CIRCUITOS SECUENCIALES

De igual manera la aplicación está preparada para ofrecer la salida de circuitos biestables utilizados en sistemas digitales. En este caso en la fila en la que se quiera representar la respuesta de un determinado biestable, debe iniciarse con un doble *. Inmediatamente se nos abre un formulario en una ventana de diálogo, tal como se ve en la figura 5, la cual nos permite definir los parámetros que intervienen. En este formulario tenemos que definir los elementos relevantes que determinan el funcionamiento del dispositivo. En el caso de Flip-Flops son por ejemplo el tipo (pulso, flanco), entradas A y B, posible negación de las entradas, valor predeterminado del estado del Flip-Flop, valores predeterminados de los señales (antes del primer pulso), si tiene pin *Enable*, *Preset* o *Clear*,....

Dependiendo de la configuración, la macro crea una llave de texto y escribe en la celda con el nombre de la señal para que el simulador gráfico pueda representar los valores correctos.

La ventana de diálogo que se abre para definir los parámetros del biestable en el que estemos interesados ofrece un conjunto de posibilidades representativas de las características que nos podemos encontrar al trabajar con este tipo de dispositivos.

En primer lugar debemos seleccionar el tipo de Flip-Flop, a continuación si queremos que actúe por pulsos o por flanco. Así mismo deberemos seleccionar que señales actúan como cada una de las entradas del biestable, si estas tienen su entrada negada o no y su valor inicial antes de que llegue el primer pulso activo.

En la TABLA 2 se muestran los distintos parámetros que intervienen en la definición de Flip-Flops.

Ejemplo:

**JK[0;0+3,0+4,0+2,0,0,0] FF JK, valor antes 0, entrada filas 3 (J) y 4 (K) no negadas, CLK es fila 2, no tiene activado ni Enable, ni Preset, ni Clear.

**D[1;0+3,0,0+2,0,0,0] FF D, valor antes 1, entrada A es fila 3, entrada B no existe, CLK es línea 2, no tiene activado ni Enable, ni Preset, ni Clear.

TABLA2. PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN LA DEFINICÓN DE FLIP-FLOPS

Flip-Flops: **X Y [t ; u ; v ; w ; z; o; p]	
**** Elemento Flip-Flop** **X** FlipFlop (JK,SR,D) **Y** Activación(P=pulso, F=flanco) **t** Valor inicial del Flip-Flop **u** = fila entrada A (J, S, D),	**v** = fila entrada B (K,R,--) **w** = fila entrada CLK **z** = fila entrada ENABLE **o** = fila entrada PRESET **p** = fila entrada CLEAR si u, v, w, z, o, p = 0 -> no tiene este PIN
Las entradas son en forma "0+i"	
0 (valor inicial, puedes ser 0 o 1) **+** (¿entrada negada?, "+"=NO, "-"=SI) **i** (fila de señal de entrada en Excel)	

Al igual que con la ventana de diálogo de puertas lógicas, una vez seleccionados los parámetros necesarios y pulsar "Crear", la aplicación está en disposición para visualizar la respuesta de salida del Flip-Flop seleccionado.

Se muestra en la figura 5 un ejemplo práctico en la ventana de diálogo. Las opciones nos permiten seleccionar si lo que queremos utilizar es un Flip-Flop (biestable síncrono) o un Latch (asíncrono).En el caso de que hayamos seleccionado activación por flanco, la opción de "activación por nivel" pulsando alto o bajo debe ser interpretada como ascendente o descendente respectivamente.

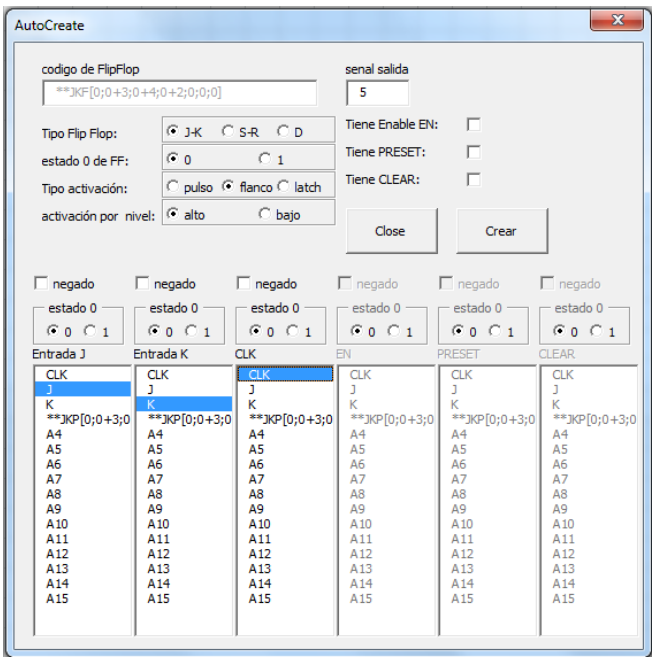


Fig. 5. Ventana de diálogo para la definición de biestables

Es conveniente recordar que el botón con la denominación "negado" nos permitirá definir la respectiva señal activa en bajo simplemente marcándolo. Esto es de especial importancia para la definición de las señales Preset y Clear, normalmente activas en bajo en los circuitos comerciales ($\overline{Preset}$ y $\overline{Clear}$).

La figura 6(a) visualiza la representación del comportamiento de este Flip-Flop ante la configuración de valores digitales indicada. En este caso la señal de la fila 2 actúa como señal de reloj, siendo las señales de las filas 3 y 4, las entradas J y K del Flip-Flop respectivamente.

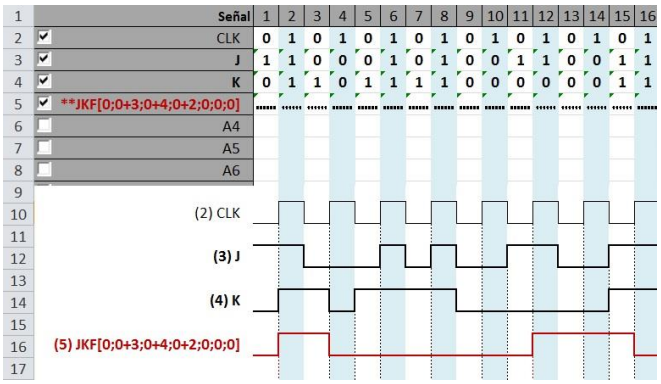


Fig. 6. (a) Representación de Flip-Flop J-K activado por flanco ascendente

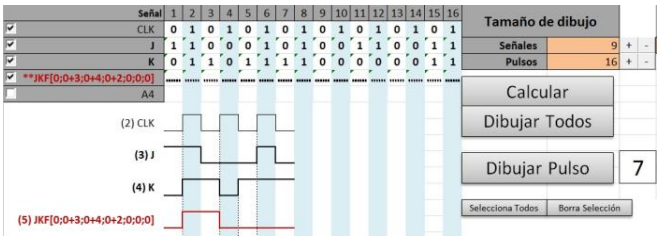


Fig. 6. (b) Visualización por pulsos

Se puede comprobar como en la fila correspondiente aparecen los parámetros de la señal visualizada: JKF[0;0+3;0+4;0+2;0;0;0], para indicar Flip-Flop J-K activo por Flanco, con entradas las filas indicadas anteriormente (3 y 4) y señal de reloj la señal de la fila 2. Los tres últimos parámetros que toman el valor 0 nos indican que en esta representación no existe una señal de Enable, ni Preset, ni Clear.

Las ventajas didácticas de la aplicación se ponen de manifiesto cuando en la exposición del funcionamiento de un determinado dispositivo hacemos que la visualización se realice por tramos en vez de la representación completa de una sola vez. Estos tramos pueden ser configuraciones de valores de entrada, si estamos ante circuitos combinacionales o tramos temporales (pulso tras pulso) si estamos ante circuitos secuenciales, como se puede observar en la figura 6(b).

Como complemento a la aplicación también se le ha dotado con la posibilidad de generar señales de reloj de forma automática, para lo cual escribiendo la palabra clave CLK en una de las filas de la ventana de diseño, no aparecerá una nueva ventana de diálogo en la cual podremos determinar el número de ciclos que queremos representar, así como la duración de los periodos en bajo y alto de la señal de reloj.

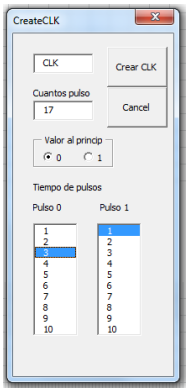


Fig. 7. (a) Ventana de creación de una señal de reloj

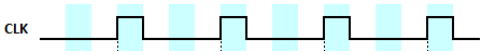


Fig. 7. (b) Señal de reloj generada

De esta forma, podremos generar señales de reloj totalmente regulares, en las que los tiempos en alta y baja de la señal de reloj son iguales en el espacio de un periodo, o desiguales dando un valor distinto al seleccionar la duración del pulso 0 y 1 en la ventana de creación del reloj. Esta asimetría se repetirá a continuación de forma periódica.

Por ejemplo, la selección de valores marcada en la ventana de creación de reloj de la figura 7(a), nos da como resultado la visualización de la señal que podemos ver en la figura 7(b).

A. *Funciones*

Es importante resaltar que toda señal generada como resultado de la intervención de una puerta o Flip-Flop, puede ser utilizada en una nueva fila del visualizador como entrada de otra función combinacional o secuencial. Con ello tenemos la posibilidad de demostrar el comportamiento de la interconexión de varios elementos, con la única limitación de las 16 señales mencionadas como límite anteriormente, si bien esto es fácilmente ampliable si fuera necesario.

En la figura 8 se muestra un ejemplo de generación de la función combinacional $f = \bar{a}\, b + c$

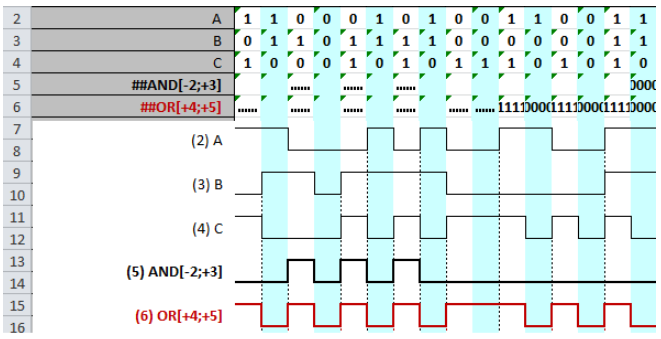


Fig. 8. Ejemplo de salidas dela función combinacional $f = \bar{a}\, b + c$ (en rojo)

De igual forma la demostración del comportamiento de agrupaciones de Flip-Flops es totalmente factible, con lo cual completamos el conjunto de elementos básicos que pueden ser manejados en electrónica digital para un aprendizaje práctico del funcionamiento de estos circuitos.

La comprobación de la forma de actuar tanto de contadores síncronos y asíncronos, como de registros de desplazamiento es totalmente factible simplemente seleccionando como entradas las salidas de una función generada anteriormente, lo cual es válido para entradas de datos y para entadas de reloj. Una selección de una señal Q de salida de un Flip-Flop como entrada de reloj de otro Flip-Flop, permitirá diseñar circuitos asíncronos.

Por ejemplo en la figura 9 se muestra la representación de las formas de onda en las salidas Q de cada uno de los Flip-Flops que constituyen un registro de desplazamiento de 4 bits con entrada serie D.

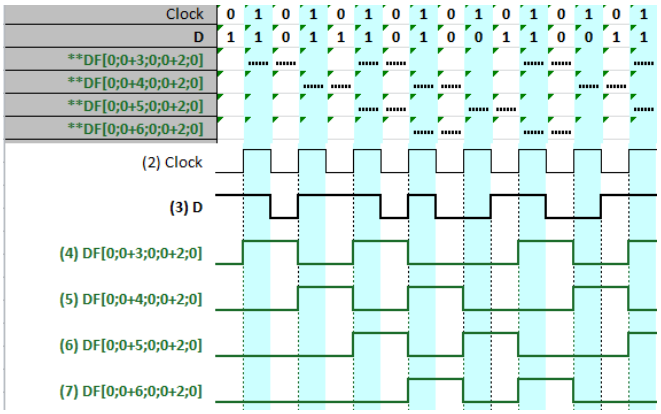


Fig. 9. Ejemplo de salidas de un registro de desplazamiento de 4 bits

V. CONCLUSIONES

El manejo de cronogramas funcionales es de gran utilidad en el aprendizaje de electrónica digital, siendo necesario un procedimiento sencillo de generación de los mismos.

Se ha desarrollado una herramienta de gran versatilidad para definir patrones de señales de entrada y analizar el comportamiento de circuitos digitales.

La herramienta permite la definición libre de cronogramas y su utilización como variables de entrada para observar la señal de salida generada.

La definición libre de patrones de señales me permite ejemplificar de detalladamente la forma en que actúan los circuitos digitales.

La herramienta muestra su poder didáctico en la presentación de supuestos simulados de forma gráfica en clase.

Así mismo, la herramienta facilita la elaboración de supuestos de trabajo escritos, destinados a la resolución autónoma o colaborativa por parte de los estudiantes.

Su utilización ha sido aplicada de forma experimental durante un curso académico por parte de los profesores de la asignatura Estructura y Tecnología de Computadores en el Grado de Informática, UAL, estando su puesta a disposición de los alumnos en el presente curso.

ACKNOWLEDGMENT

Este Trabajo ha sido desarrollado en el marco “Convocatoria de Grupos Docentes para la Creación de Materiales Didácticos en la Universidad DeAlmería. Bienio 2017-2018”.

REFERENCES

[1] http://www.pspice.com/about
[2] http://designworkssolutions.com/logicworks-5-windows/
[3]] D. Baneres, “Aprendiendo jugando fundamentos de sistemas digitales,” Actas de las XXII Jenui. Almería, 6-8 de julio 2016. ISBN: 978-84-16642-30-4, pp. 269-276
[4] M. Ruiz-Ferrándiz, G. Ortega, J. Roca-Piera. “Learning Analytics and Evaluative Mentoring to increase the students' performance in Computer Science”. EDUCON2018-IEEE Global Engineering Education Conferenc. Santa Cruz de Tenerife, april, 2018. En prensa.
[5] M. Prim, J. Oliver, y V. Soler,“Aprendizaje de Sistemas Digitales utilizando tecnologías interactivas,” IEEE-RITA Vol. 4, Núm. 1, Feb. 2009.
[6] D. Baneres, R. Clarisó, J. Jorba, and M. Serra, “Experiences in digital circuit design courses: A self-study platform for learning support,” in IEEE Transactions on Learning Technologies, vol. 7, no. 4, pp. 360–374, Oct 2014.
[7] G.A. Contreras, R. García y M.S. Ramírez, “Uso de simuladores como recurso digital para la transferencia de conocimiento,” Apertura Revista de Innovación Educativa, ISSN Impreso: 1665-6180 Número 1, Volumen 2, Universidad de Guadalajara, México, Abril 2010
[8] C. Quintáns, J. Fariña, J.J .Rodríguez-Andina, “Aprendizaje Práctico de Sistemas Electrónicos Digitales a través de Proyectos Semiguiados,” IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje. Electrónico ISSN: 1932-8540 Issue: 99. 31 July 2017.

Definición de máquinas de estados, eventos y acciones en pequeños procesadores

Aitzol Zuloaga, Jaime Jiménez, Jesús Lázaro, Carlos Cuadrado, Unai Bidarte
Departamento de Tecnología Electrónica
Universidad del País Vasco (UPV/EHU)
Bilbao, España
Email: {aitzol.zuloaga, jaime.jimenez, jesus.lazaro, carlos.cuadrado, unai.bidarte}@ehu.es

***Resumen*—Las máquinas de estados son herramientas fundamentales para el desarrollo de sistemas digitales de diversa índole. En los cursos de "Electrónica Digital", las máquinas de estado se utilizan en su versión conceptualmente más simple para desarrollar sistemas medianamente complejos. Posteriormente, en el curso de "Sistemas Digitales", las máquinas de estado se amplían para incluir nuevos conceptos propios de los sistemas basados en procesadores. En este trabajo se presenta un procedimiento para la enseñanza de las máquinas de estados y máquinas de eventos normalizando los conceptos y los procedimientos para su correcta implementación en procesadores. El objetivo final es presentar a los estudiantes un decálogo que les permita el diseño profesional de sistemas de funcionamiento eficiente y robusto.**

Keywords*—Máquinas de estado, procesadores, funcionamiento robusto, método de diseño.

I. INTRODUCCION

Este trabajo analiza diferentes conceptos involucrados en el diseño de máquinas de estado y eventos. Se enmarca principalmente en la asignatura "Sistemas Digitales", aunque debe ser considerado como una continuación de los primeros conceptos introducidos en la asignatura de "Electrónica Digital". En concreto, estas asignaturas se imparten para la titulación de Grado en Ingeniería en Tecnología de Telecomunicación en la Escuela de Ingeniería de Bilbao [1].

La utilización de las estructuras de máquinas de estados y eventos [2], representa la forma más idónea y profesional de realización de proyectos basados en pequeños procesadores. Además son el puente entre la enseñanza de la electrónica digital y la enseñanza de los sistemas operativos utilizados en procesadores de gran capacidad.

Por otro lado, el uso de pequeños procesadores a modo de afición por un gran número de personas y la gran difusión por Internet de pequeños programas, crea una disyuntiva a la hora de decidir los tópicos que deben ser tratados en un curso profesional. Por ello, para la asignatura de "Sistemas Digitales", nos hemos decantado por enseñar cómo diseñar y realizar estructuras de programación más complejas y robustas que son utilizadas en el ámbito profesional. Por ello, dentro de la temática abordada, están las máquinas de estados y eventos, dejando en un segundo plano detalles tan específicos como la programación de un determinado periférico de un procesador específico. Estos últimos se encuentran por doquier en los manuales de los procesadores, libros, revistas y páginas web. Sin embargo, las máquinas de estados y eventos para pequeños procesadores no se encuentran extensamente abordadas en ningún medio.

Es cierto que en los cursos de Electrónica Digital, las máquinas de estado son de obligado estudio, y ello se corrobora en las Guías Docentes de diversas titulaciones impartidas en universidades españolas. Sin embargo, la evolución del tema para el ámbito de la programación de pequeños procesadores y microcontroladores en lenguajes de bajo nivel, es una gran ausente en las Guías Docentes en las universidades españolas. Con la información escrita en libros e Internet, sucede algo similar: se encuentra mucha información al respecto para la aplicación en circuitos digitales y la programación de aplicaciones avanzadas, pero casi nada para la utilización en pequeños procesadores con lenguajes de bajo nivel. Una honrosa excepción podemos encontrarla en el libro de M. Lynch [3] para cursos en la Universidad de Florida

Las máquinas de estado y eventos, al ser estructuras muy concretas, permiten al profesorado una evaluación más sistemática y realista del desempeño del estudiante, sin dejar de lado el hecho de que se dota de una poderosa herramienta para el futuro profesional del estudiante en aras de mejorar la calidad de los productos diseñados.

En este documento se presentarán primero las definiciones de los conceptos fundamentales: los estados, los eventos y las acciones. Posteriormente, se estudiará la "máquina de eventos" en su forma más simple. A partir de ésta se pasará a estudiar la "máquina de estados y eventos" y, por último, se estudiará la "máquina de estados de evento único". Esta división del estudio en tres máquinas distintas se realiza para facilitar la asimilación, por parte del estudiante, de las variantes más comunes en que es posible encontrar estas máquinas. En el estudio de las diferentes máquinas se introduce al estudiante de una manera escalonada en los mencionados conceptos.

Cada una de estas máquinas tiene su utilidad particular en determinadas aplicaciones y permiten soluciones rápidas, de funcionamiento robusto y de fácil adaptación. En la sección correspondiente a cada una de ellas se perfilará el tipo de aplicaciones a las cuales se dirige.

La herramienta más importante en el desarrollo de las máquinas de estados y eventos son los diagramas que conceptualizan los mismos. En el estudio se ha hecho especial hincapié en seguir una serie de reglas para realizar los diagramas de estados, eventos y acciones, con el objetivo de detectar los posibles errores en el desarrollo de las máquinas y a la vez

permitir una fácil y eficiente implementación en el marco de los microcontroladores.

Por último, en el estudio se establece la conversión de los diagramas de estado, eventos y acciones en diagramas de flujo para que puedan ser implementados en cualquiera de los lenguajes destinados a procesadores. En el caso en particular de las asignaturas en la Escuela de Ingeniería de Bilbao, se utiliza el lenguaje ensamblador de los procesadores PIC16 dado que permite entender mejor el procesador desde una perspectiva de máquina electrónica [4,5,6]. El lenguaje ensamblador del PIC16 tiene un reducido conjunto de instrucciones y es especialmente indicado para el desarrollo de máquinas de estados y eventos.

Entre los principales objetivos establecidos para la docencia de la asignatura de Sistemas digitales están los siguientes:

- Conocer los principios básicos de funcionamiento interno de un procesador desde el punto de vista de máquina electrónica.
- Ampliar los conceptos fundamentales de las máquinas de estado, adquiridos en Electrónica digital, con las nuevas posibilidades que brinda el uso de la programación.
- Interiorizar la necesidad de utilizar estructuras de programación profesionales para el desarrollo de sistemas de funcionamiento eficiente y robusto.

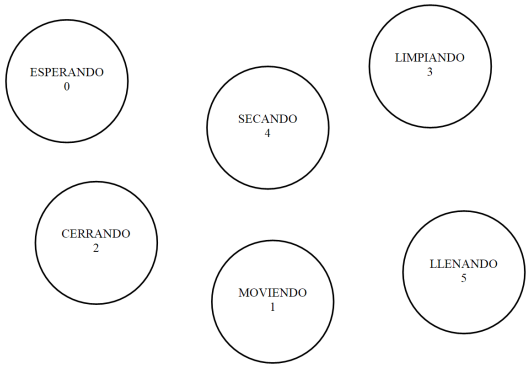


Fig. 1. Ejemplo de un espacio de estados con el número y el nombre del estado.

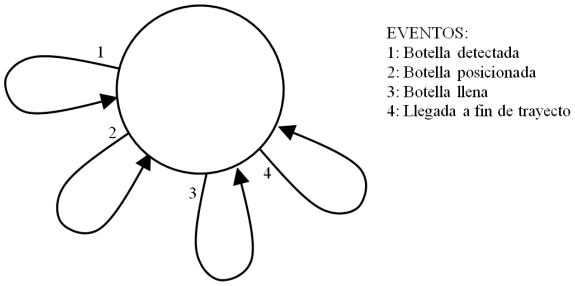


Fig. 2. Ejemplo de un diagrama de eventos.

II. Estados, eventos y acciones

A. Estados

En su forma más simple, un "estado" es un comportamiento determinado de un sistema [7]. Por ejemplo, en una lavadora, podemos definir estados tales como "cargando agua", "lavando" o "centrifugando".

Es difícil transmitir al estudiante novel la estabilidad o quietud del concepto de "estado". En el ejemplo anterior, cuando una lavadora está "lavando" pensamos en que algo se mueve, sin embargo, el módulo de control simplemente está quieto, dando paso de corriente al motor por alguna conexión específica.

En los sistemas digitales el estado es un número almacenado en un registro o memoria: "la variable de estado". Eventualmente pueden existir tantos estados como el mayor número almacenable en la variable de estado.

Gráficamente, un estado se representa como una pelota, con un número asociado. Usamos el término "pelota" para dar la idea de ser una esfera tridimensional sólida donde no hay cambios ni movimientos. Por lo general, buscando la máxima simplificación, los estados se numeran consecutivamente comenzando por el estado número cero (0). También, para una fácil comprensión por el diseñador, a cada estado se le asocia un nombre, a ser posible corto.

Con frecuencia un sistema puede presentar varios estados. Éstos se representan gráficamente como un conjunto de pelotas al cual podemos denominar "espacio de estados" (Fig. 1).

B. Eventos

Un "evento" es la ocurrencia de un estímulo al sistema que provocará que éste realice ciertas operaciones [8]. Por ejemplo, en un teléfono, la pulsación de cualquiera de sus teclas producirá determinadas señales sobre la línea telefónica. En este caso los eventos serán "presionada tecla 1", "presionada tecla 2", etc.

Al igual que los estados, los eventos se representan con números enteros consecutivos. Sin embargo, hay dos características que los diferencian. El evento cero (0) se suele utilizar para indicar que no ha ocurrido evento alguno. Además, los eventos se producen instantáneamente y desaparecen en cuanto se procesan, no quedan almacenados en una variable como ocurre con los estados.

Gráficamente, podemos representar los eventos como flechas saliendo de una pelota. Esta representación no suele ser habitual pero permite una uniformidad en el desarrollo del tema de máquinas de estados y eventos. Cada flecha tiene un número de evento asociado y escrito en el punto de salida de la flecha (Fig. 2). Para facilitar la formación del estudiante, se recomienda que se representen todos los eventos a excepción del evento cero. Si bien los eventos pueden tener un nombre o frase que los identifique, por simplicidad, en el diagrama sólo se representan con números. Los nombres o frases pueden colocarse a modo de leyenda al lado del gráfico.

En un sistema los eventos se recogen de diversas fuentes como pueden ser un teclado, un temporizador o un conjunto de interruptores. En todos ellas las rutinas generarán un número distinto de cero, el evento, sólo cuando ocurra un cambio. Así,

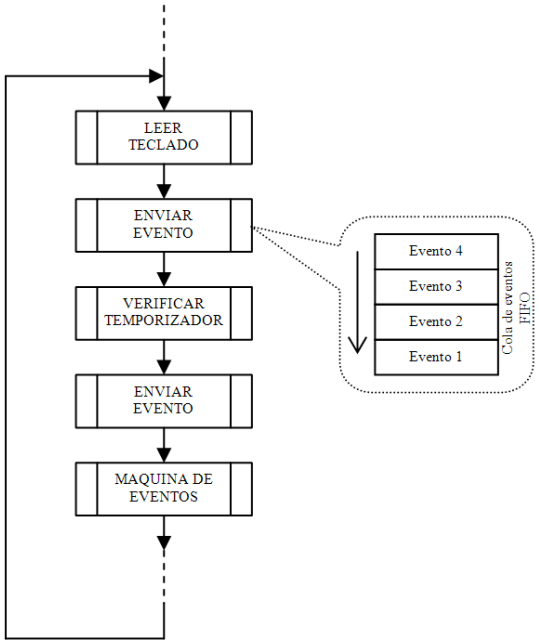


Fig. 3. Recolección de eventos y procesamiento de los mismos en el lazo del programa principal.

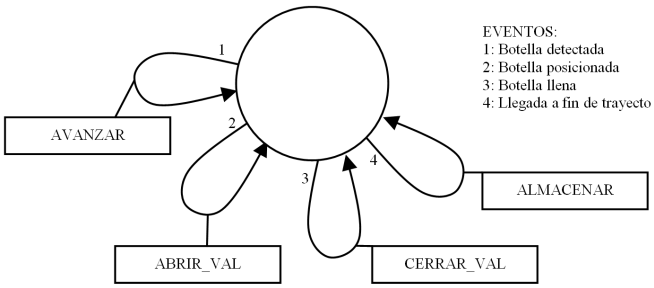


Fig. 4. Diagrama de eventos con acciones.

por ejemplo, la rutina de lectura de teclado producirá un evento en los instantes en que se presiona o deja de presionar una tecla, una rutina de temporización producirá un evento sólo en el instante que se alcance un determinado valor de tiempo, etc.

En el lazo principal del programa, los eventos recolectados por las diferentes rutinas de supervisión son almacenados por una rutina de "envío de eventos" (por lo general, en una cola FIFO) para que posteriormente sean procesados por las máquinas de eventos (Fig. 3).

C. *Acciones*

Las "acciones" son rutinas que efectúan las diferentes operaciones que se requieren en el sistema a consecuencia de los eventos ocurridos.

Las acciones se representan como rectángulos conectados a las flechas de los eventos. Dentro del rectángulo se pone un nombre corto para identificar la rutina de acción (Fig. 4).

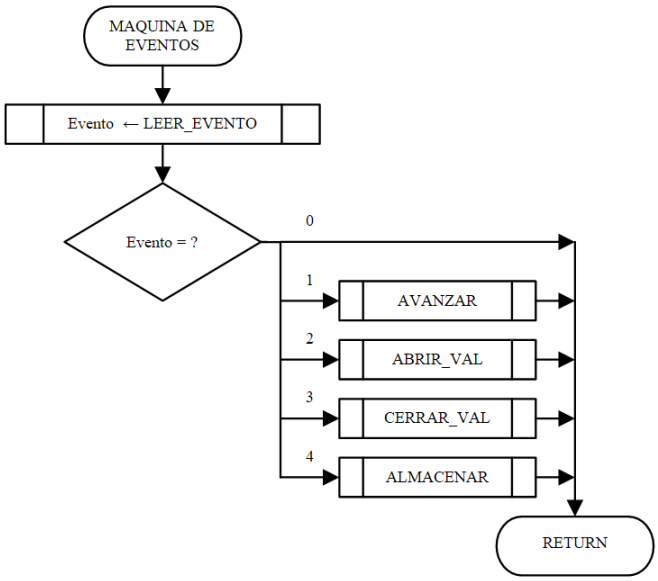


Fig. 5. Diagrama de flujo de una máquina de eventos.

```
;*****************************************************************
; Máquina de eventos
; (Para ubicar en posiciones de 000h a 0FFh)

MAQEVE:
     CALL   LEER_EVENTO ; Se lee evento
     ADDWF  PCL,F       ; Se salta a la rutina de acción
     RETURN             ; Evento 0: No hay evento
     GOTO   AVANZAR     ; Evento 1: Botella detectada - Avanzar
     GOTO   ABRIR_VAL   ; Evento 2: Botella posicionada - Abrir válvula
     GOTO   CERRAR_VAL  ; Evento 3: Botella llena - Cerrar válvula
     GOTO   ALMACENAR   ; Evento 4: Llegada a fin trayecto - Almacenar
```

Fig. 6. Máquina de eventos desarrollada en lenguaje ensamblador para procesadores PIC16.

III. MÁQUINAS DE EVENTOS

Las máquinas de eventos son programas que permiten ejecutar acciones ante la ocurrencia de un evento.

En su forma más simple, las máquinas de eventos se utilizan para desarrollar sistemas donde un evento siempre ejecuta una misma acción. Son muchas las aplicaciones que siguen esta forma de operar: calculadoras, teléfonos simples, organillos, etc. Son aplicaciones que pueden ser descritas con frases como "con este botón hace esto, con este otro botón hace esto otro".

El diagrama de flujo de la máquina de eventos ejemplificada por la Fig. 4 (una máquina de rellenado de botellas) se representa en la Fig. 5. En ese diagrama se observa la rutina que lee los eventos de la cola de eventos (LEER_EVENTO). Además, se observa la característica básica de las máquinas de eventos: el evento cero representa la ausencia de eventos y por tanto no hay nunca acción asociada al mismo. Obsérvese también que en el diagrama de flujo se utilizan los mismos nombres utilizados en el diagrama de eventos para las acciones.

La implementación de las máquinas de eventos varía de un procesador a otro o de un lenguaje de programación a otro. Sin embargo, la implementación puede hacerse con gran eficiencia

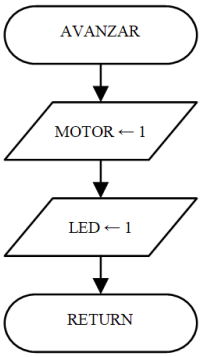


Fig. 7. Las acciones suelen ser rutinas sencillas.

en la mayoría de los procesadores si se siguen ciertas pautas:

- Seleccionar números enteros consecutivos a partir del uno (1) para especificar los eventos.
- Utilizar un solo nombre para cada acción aunque la misma reúna en sí varias acciones más pequeñas.
- Utilizar sólo acciones que no reciban parámetros.

En la Fig. 6 puede observarse la implementación básica de una máquina de eventos en los microcontroladores de 8 bits PIC16. Esta implementación, aparte de sencilla, es muy eficiente dado que sólo requiere 3 ciclos de instrucción para acceder a la rutina de acción, independientemente del evento que trate.

Las acciones, por lo general, suelen ser rutinas relativamente sencillas, que en el caso de los pequeños microcontroladores puede ser escribir algo en pantalla y accionar algún dispositivo externo (Fig. 7).

Es importante también señalar que la rutina de lectura de eventos, utilice o no el sistema de colas, debe retirar el evento leído, es decir, "consumir el evento". De esta forma se evitan los problemas ocasionados por eventos circulantes.

De esto también se desprende la conclusión de que en una acción nunca se debe volver a preguntar por el evento. Se supone que esto ha sido una pregunta previamente procesada por la máquina de eventos.

Esto no excluye casos en los que se requiera cierta información adicional, por ejemplo en el teclado de una calculadora. En ella tenemos dos grandes grupos de eventos: las teclas numéricas y las teclas de operación. En estos casos pueden definirse los eventos en dos dimensiones: el evento propiamente dicho y el dato del evento. Así, en la máquina de eventos se determina si fue un evento producido por una tecla numérica o una tecla de operación y, en la acción correspondiente a una tecla numérica, se almacena el dato del evento (el valor numérico).

IV. Máquinas de estado y eventos

Los sistemas más modernos, donde es posible ejecutar y configurar múltiples aspectos de su funcionamiento, utilizan la combinación de los conceptos de estado y eventos. Un ejemplo muy familiar de estos sistemas lo tenemos en los

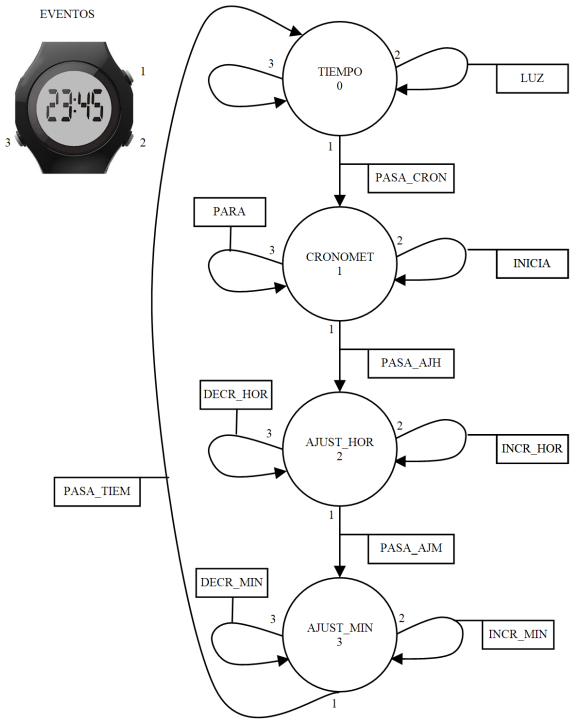


Fig. 8. Diagrama de estados, eventos y acciones en un reloj digital.

relojes digitales de pulsera donde, utilizando muy pocas teclas, disponemos de una muy amplia gama de funciones. Siguiendo este ejemplo, se puede desarrollar un diagrama donde se combinen los estados, los eventos y las acciones (Fig. 8).

Tal y como se observa en la Fig. 8, el diagrama de estados, eventos y acciones es la superposición de los diagramas de eventos para cada estado del sistema en un único diagrama. La primera característica a señalar es que los eventos en cada estado ejecutan diferentes acciones, por ello, un mismo botón o pulsador puede tener una función distinta en cada estado. Esto es la base de los sistemas actuales que trabajan con menús.

El mayor problema que presentan los estudiantes al desarrollar diagramas de estados, eventos y acciones es el cambio de paradigma de pensamiento con respecto al clásico desarrollo de programas lineales que utilizan contadores para el control de ramificaciones [9]. El problema conceptual reside en que los contadores son en esencia máquinas de estado en su forma más rudimentaria y el lidiar con varias máquinas de estado complica los programas, limita la modularidad y hace a los sistemas más propensos a fallos.

El diagrama de flujo de la máquina de estados es muy parecido a la máquina de eventos. Para el ejemplo que se viene utilizando se presenta en la Fig. 9. Lo primero que se observa, a diferencia de la máquina de eventos, es que el estado es una variable y no se obtiene de una cola por medio de una rutina. En segundo lugar, se observa que el estado cero (0) tiene una rutina asociada, algo que no ocurre con las máquinas de eventos.

Por otro lado, en las ramas de la máquina de eventos están las rutinas de acción. En la máquina de estados, las rutinas en las ramas son los nombres de las máquinas de eventos

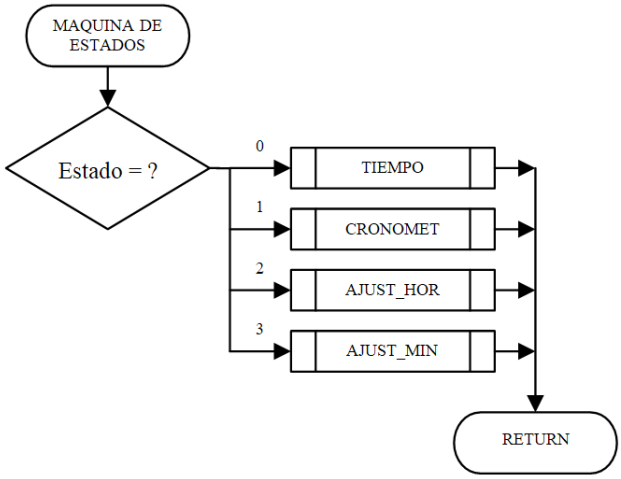


Fig. 9. Diagrama de flujo de la máquina de estados de un reloj digital.

```
;*********************************************************************
; Máquina de estados
; (Para ubicar en posiciones de 000h a 0FFh)

MAQEST:
     MOVF   Estado      ; Se lee estado
     ADDWF  PCL,F       ; Se salta a maquina de eventos correspondiente
     GOTO   TIEMPO      ; Estado 0: Mostrar tiempo
     GOTO   CRONOMET    ; Estado 1: Mostrar cronómetro
     GOTO   AJUST_HOR   ; Estado 2: Mostrar ajuste de horas
     GOTO   AJUST_MIN   ; Estado 3: Mostrar ajuste de minutos
```

Fig. 10. Máquina de estados desarrollada en lenguaje ensamblador para procesadores PIC16.

correspondientes a cada estado (Fig. 11). Obsérvese que se denominan con el mismo nombre del diagrama de estados.

Nuevamente, la implementación varía de un procesador a otro o de un lenguaje de programación a otro, pero suele ser bastante similar a la implementación de la máquina de eventos, tal y como puede verse en la Fig. 10 para un procesador PIC16. Nuevamente, la selección de la rutina de máquina de eventos correspondiente se selecciona en tan solo 3 ciclos de instrucción.

Tal y como se observó en el espacio de estados de la Fig. 1, se disponía de un universo de modos o formas de operar del sistema, pero no había ninguna representación sobre la manera de pasar de un modo a otro. Ahora, el uso de los eventos permite cambiar de modo, o lo que es lo mismo, cambiar de estado. En este punto, es preciso señalar que el responsable de cambiar el estado es la acción, cambiando el valor de la variable de estado (Fig. 12).

V. MÁQUINAS DE ESTADOS DE EVENTO ÚNICO

Existen otras aplicaciones para las cuales las máquinas de estados tienen una utilidad especial. Son aplicaciones relacionadas con interfaces de comunicación. En ellas, por lo general, se requiere cumplir con ciertos tiempos y pasar por una serie de etapas o estados. El único evento involucrado es el tiempo. Las máquinas de estado para este tipo de aplicaciones las denominaremos "máquinas de estados de evento único".

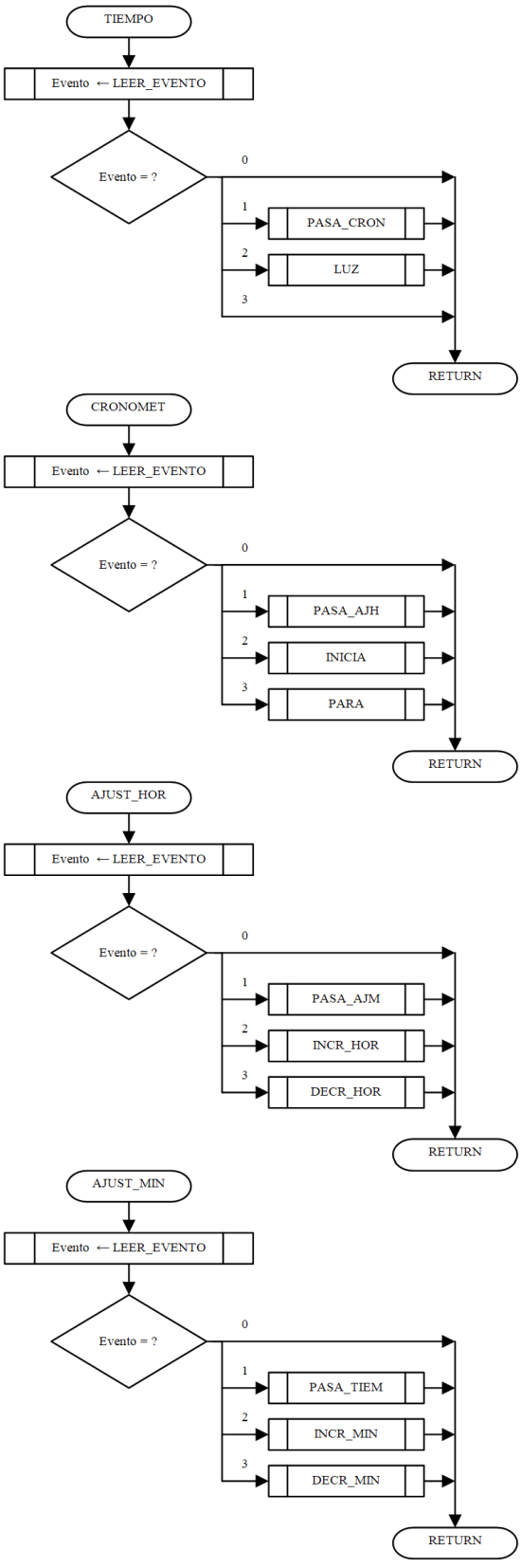


Fig. 11. Diagrama de flujo de una máquina de estados.

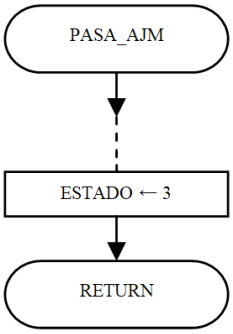


Fig. 12. El cambio de estado se realiza en las acciones.

Las máquinas de estado de evento único, a diferencia de las máquinas de eventos y las máquinas de estado y eventos, se ejecutan desde una interrupción de tiempo periódica (Fig. 13).

Es cierto que, hoy día, los microcontroladores cuentan con varios periféricos de comunicaciones, sin embargo, en muchos casos se requieren formatos de comunicación distintos a los comúnmente disponibles o se requieren más periféricos de los que se disponen en el microcontrolador. Las máquinas de estado de evento único pueden gestionar estos casos.

El diagrama de una máquina de estados de evento único es parecido a los diagramas de las máquinas de estado y eventos, con la gran diferencia de que sólo una flecha de evento sale de cada pelota de estado. En la Fig. 14 se representa un diagrama de estado de evento único de un transmisor serie sencillo. Las flechas representan el evento tiempo: la interrupción periódica. Hay una excepción: la flecha dibujada con línea punteada que sale del estado de "reposo". Esta línea punteada señala que el arranque de la comunicación se realiza por una intervención no sincronizada en la interrupción. El cambio de estado es realizado en algún punto del programa principal (Fig. 15) fuera de la interrupción.

Otra característica que distingue a las máquinas de estado de evento único es que en las ramas del diagrama de flujo se llama directamente a las acciones (Fig. 16) y no a máquinas de eventos. Además, el hecho de que la salida del estado de reposo se realice por una rutina externa, hace que la rama correspondiente al estado cero (0) no posea ninguna acción.

De la Fig. 16 se desprende también otra característica que facilita la reutilización de las acciones para distintos estados. Esto puede ser hecho siempre que se planifique correctamente la asignación del número asociado a cada estado y es válido tanto para las máquinas de estados y eventos como para las máquinas de estado de evento único. En el ejemplo de la Fig. 14, los estados son consecutivos. La rutina de acción de transmisión de bits TX_BIT pudiera ser desarrollada de la forma mostrada en la Fig. 17. Obsérvese que la extracción del bit de dato se hace apuntando con el estado y que el cambio de estado se realiza con un incremento de la variable de estado. En cualquier caso es importante que en las acciones no se pregunte nuevamente por el estado, ya que se supone que esa discriminación ya está hecha en la máquina de estados.

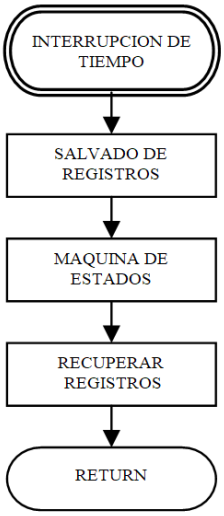


Fig. 13. Ubicación de la máquina de estados de evento único en la interrupción de tiempo.

VI. CASOS ESPECIALES

Las máquinas de estado y eventos admiten muchas variantes que permiten utilizarlos en muchas aplicaciones de diversa índole. A continuación se explicitan unos casos especiales.

A. *Eventos ramificados*

Hay aplicaciones, como aquellas que exigen una clave de acceso, que después de recibir una cierta cantidad de dígitos se validan los dígitos recibidos. Con frecuencia estas validaciones se confunden con "estados de validación", lo cual es incorrecto. Una validación es una acción y en ella, dependiendo de la validación o no, se decide cuál va a ser el próximo estado (Fig. 18).

B. *Eventos de tiempo*

Otro caso que se da con frecuencia en las máquinas de estado y eventos, es la combinación de eventos producidos por teclas y eventos producidos por temporizadores. Este es el caso de relojes y crono-termostatos. En este tipo de dispositivos además de tener varios eventos generados por las diferentes teclas, se tiene un evento que marca el paso de los segundos. Para estos casos, los diferentes estados del sistema deben contemplar la actualización de los contadores de tiempo en, prácticamente, todos los estados.

C. *Supervisiones de tiempo*

Otra aplicación donde también surgen eventos relacionados con el tiempo son aquellas en el que se quiere supervisar un determinado tiempo. Por ejemplo, una calculadora que se apaga luego de estar un tiempo sin que se presione una tecla. En estos casos, las acciones asociadas a los eventos de tecla llaman a una rutina que inicializa un contador de tiempo. Cuando se concluye el tiempo asignado al contador, se genera el evento de "fin de supervisión de tiempo", que será atendido por la acción correspondiente en el estado correspondiente.

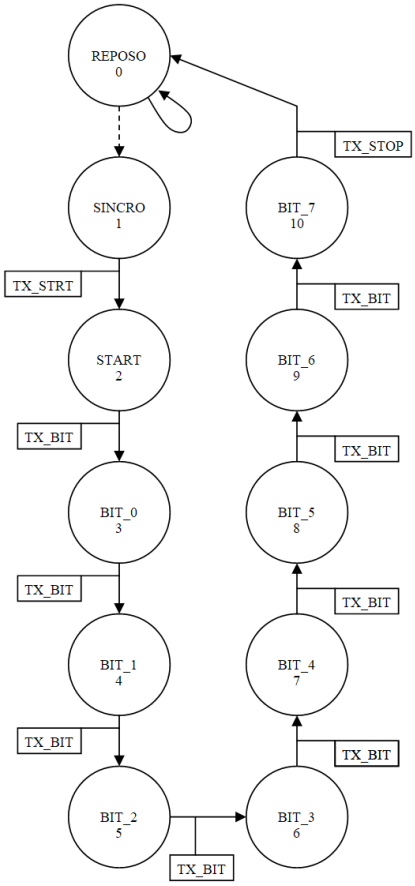


Fig. 14. Diagrama de estados de evento único de un transmisor serie.

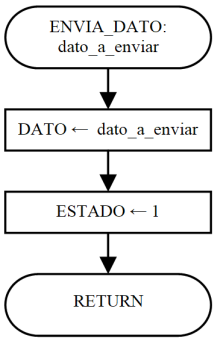


Fig. 15. Activación de la máquina de estados de evento único por rutina en el lazo principal.

VII. DECÁLOGO

A manera de resumen se presenta en esta sección un pequeño decálogo de pautas que deben tomarse en cuenta en el diseño de las máquinas de estados, eventos y acciones:

- Debe determinarse el tipo de máquina más adecuado al funcionamiento deseado del sistema.
- Se diseña el diagrama de estados-eventos-acciones del sistema.

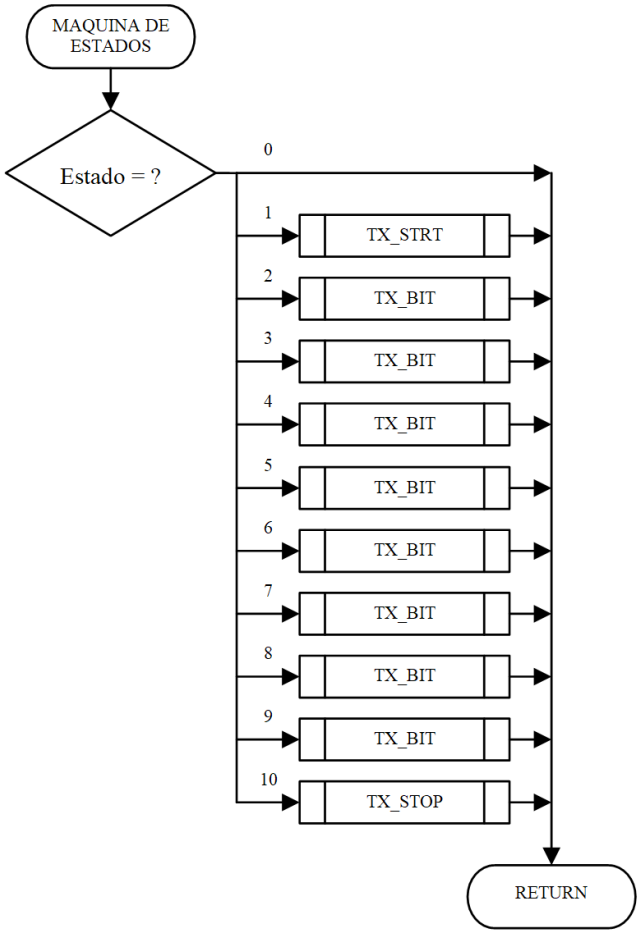


Fig. 16. Diagrama de flujo de una máquina de estados de evento único para un transmisor serie.

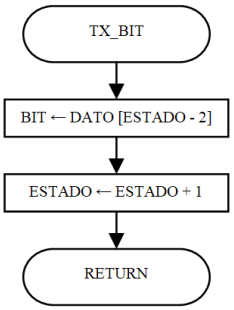


Fig. 17. Diagrama de flujo de una rutina de acción que puede ser reutilizada en diferentes estados.

- Se numeran todos los estados comenzando por el cero (0). De ser posible, la numeración debe ser consecutiva en las ramas que presente el diagrama. Esto ayuda a la simplificación de ciertas acciones.
- En cada estado deben representarse todos los eventos existentes salvo el evento cero (0). Este último debe omitirse para minimizar posibles confusiones.
- Si se obtiene algún estado del cual no pueda pasarse a

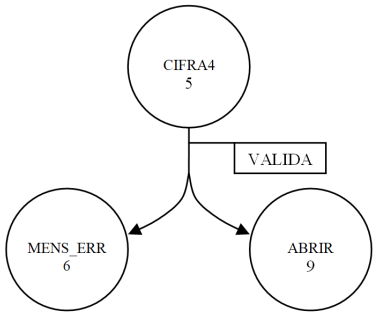


Fig. 18. Los eventos se ramifican a causa de una acción.

otro estado por medio de uno de los eventos definidos, es muy posible que el "estado" no sea tal o que falta definir algún nuevo evento.

- Es posible que los eventos que no obliguen a un cambio de estado no tengan acción asociada, pero es imperativo que los eventos que generen cambios de estado tengan asociada una acción (porque el cambio de estado lo realiza la acción).
- En los eventos que presenten ramificaciones, la rutina de acción realiza la ramificación, por tanto, al dibujar el rectángulo de acción debe hacerse antes de la ramificación de la flecha de evento.
- Desarrollar el diagrama de flujo de la máquina de estados. En el caso de una máquina de estados y eventos, se sugiere poner a cada ramificación el mismo nombre utilizado para el estado en el diagrama. En el caso de una máquina de estados de evento único, los nombres de las ramificaciones serán los nombres de las acciones. El número de ramificaciones debe coincidir con el número estados en los diagramas.
- Las acciones nunca reciben ni retornan parámetros directamente (en lenguaje C serían tipo "*void*" en cuanto a entrada o salida de parámetros).
- Si por alguna razón aparece la necesidad de utilizar un contador en las acciones, es muy probable que el diagrama de estados y eventos sea incorrecto. Un contador es una máquina de estados encubierta y pueden producirse problemas de sincronización entre las dos máquinas de estado.
- La existencia de variables lógicas (banderas) en las acciones también puede ser considerado como un contador de un bit y por tanto se aplica lo expresado en el párrafo anterior.
- Las máquinas de estado y eventos son estructuras donde se detecta el valor tanto del estado como del evento, por lo que resulta una posible incoherencia preguntar en las acciones por estas variables.

VIII. Conclusiones

Con frecuencia, los cursos de Sistemas Digitales se centran en cursos excesivamente teóricos sin aplicación práctica, o excesivamente prácticos dedicados a un procesador o plataforma en particular. El estudio de las máquinas de estados y eventos en tales cursos, además de ser una herramienta que los estudiantes pueden utilizar con utilidad en su ejercicio profesional, permite organizar el curso sobre unas estructuras que son útiles para cualquier procesador y lenguaje de programación.

Por otro lado, las máquinas de estados y eventos, permiten evaluar con mayor objetividad el desempeño del alumno, porque son estructuras muy concretas que deben cumplir ciertas normas para que puedan ser utilizados en grupos de trabajo, competencia ésta que es muy exigida por el sistema educativo [10] y las empresas.

También, el hecho de centrar el curso de Sistemas Digitales, en la utilización de un procesador o plataforma en particular, explicar un lenguaje y dejar que los estudiantes desarrollen alguna aplicación, encierra grandes riesgos: una gran cantidad de aplicaciones de dudosa calidad disponibles en Internet que favorece el plagio y la creación de malos hábitos en el desarrollo de programas.

Agradecimientos

El trabajo descrito en esta publicación ha sido generado y patrocinado por el Departamento de Educación, Política Lingüística y Cultura del Gobierno Vasco en base a las ayudas para apoyar las actividades de grupos de investigación del sistema universitario vasco IT978-16 y por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto de investigación TEC2017-84011 y los fondos FEDER.

Referencias

[1] BOPV. RESOLUCIÓN de 20 de diciembre de 2010, de la Vicerrectora de Ordenación Académica, de la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea, por la que se procede a la publicación del plan de estudios del Grado en Ingeniería Técnica de Telecomunicación de la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea. Boletín Oficial del País Vasco, nº 44 de 4 de marzo de 2011.

[2] A. Zuloaga, A. Astarloa, *Sistemas de procesamiento digital*, Madrid: Delta Publicaciones, 2008.

[3] M. A. Lynch, *Microprogrammed State Machine Design.* Boca Raton: CRC Press, 1993.

[4] A. Zuloaga, A. Astarloa, *Sistema Digital PICTOR*, Bilbao: Servicio de publicaciones de la Escuela de Ingeniería de Bilbao, 2013

[5] A. Zuloaga, *Laboratorio de Sistemas Digitales*, Bilbao: Servicio de publicaciones de la Escuela de Ingeniería de Bilbao, 2013

[6] A. Zuloaga, J. Jiménez, I. Kortabarria, J. Andreu, " PICTOR: circuito impreso para montar un sistema digital básico," , pp. 315- 319, XI Congreso de Tecnologías, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (TAEE 2014), Sevilla (España), Junio 11-13, 2014.

[7] "State (computer science)", Wikipedia, 2018. [En línea] Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/State_(computer_science) [Accedido: 20/02/2018].

[8] "Event (computing)", Wikipedia, 2018. [En línea] Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Event_(computing) [Accedido: 20/02/2018].

[9] J. Jiménez, C. Cuadrado I. Kortabarria, J. Andreu, A. Zuloaga, , "Dificultades al aprender a especificar máquinas de estados en sistemas microprogramados," , pp. 428, XII Congreso de Tecnologías, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (TAEE 2016), Sevilla (España), Junio 22-24, 2016.

[10] BOE. Orden CIN/352/2009, de 9 de febrero, por la que se establecen los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico de Telecomunicación, 20 de febrero de 2009.

Las máquinas de tiempo como base del procesamiento en tiempo real con pequeños procesadores

Aitzol Zuloaga, Jaime Jiménez, Jesús Lázaro, Carlos Cuadrado, Unai Bidarte
Departamento de Tecnología Electrónica
Universidad del País Vasco (UPV/EHU)
Bilbao, España
Email: {aitzol.zuloaga, jaime.jimenez, jesus.lazaro, carlos.cuadrado, unai.bidarte}@ehu.es

***Resumen*—Habitualmente las máquinas de estados son estructuras fundamentales para desarrollar sistemas basados en pequeños procesadores y forman la base conceptual de los sistemas operativos. Sin embargo, las máquinas de estado no aportan la capacidad de procesamiento en tiempo real que requieren algunos sistemas. Para ello es necesario recurrir a otra estructura: las máquinas de tiempo. El concepto fundamental de las máquinas de tiempo permite dotar a pequeños procesadores con otro nivel de capacidad. Por esto último, el tema es tratado en el curso de "Sistemas Digitales" del Grado en Ingeniería en Tecnología de Telecomunicación, como una ampliación del tema de máquinas de estado, eventos y acciones.**

Keywords*—*Máquinas de tiempo, máquinas de estado, procesadores, funcionamiento robusto, método de diseño.

I. INTRODUCCION

En este trabajo se introduce la máquina de tiempo como una estructura de software que, junto a las máquinas de estados y eventos, permite dotar a los pequeños procesadores de una gran capacidad para aquellas aplicaciones donde las condiciones temporales son estrictas. Además permite el máximo aprovechamiento de la capacidad de procesamiento del dispositivo.

El tema de las máquinas de tiempo se enmarca en la asignatura "Sistemas Digitales" que se imparte para la titulación de Grado en Ingeniería en Tecnología de Telecomunicación en la Escuela de Ingeniería de Bilbao [1]. Entre los principales objetivos establecidos para la docencia de la asignatura de Sistemas digitales están los siguientes:

- Conocer los principios básicos de funcionamiento interno de un procesador desde el punto de vista de máquina electrónica.
- Interiorizar la necesidad de utilizar estructuras profesionales para el desarrollo de programas para el diseño de sistemas de funcionamiento eficiente y robusto.
- Conocer el funcionamiento de una máquina de tiempo.

En la literatura las máquinas de tiempo, en sus diferentes variantes, son denominadas habitualmente como "Planificadores" [2], "Secuenciadores" [3] o "*Time Schedulers*" [4]. Aquí hemos preferido la denominación de "máquina de tiempo" porque hace que el estudiante lo relacione con el concepto de "máquina de estados" con el que guarda cierta relación.

Las máquinas de tiempo son el concepto fundamental que da pie a los sistemas operativos de tiempo real [2,4,5]. Por ello, este tema constituye un puente entre la enseñanza de los pequeños microcontroladores en los cursos de Sistemas Digitales y la enseñanza de los sistemas operativos más propia de los cursos de informática avanzada.

La gran proliferación en el mercado de pequeños sistemas de desarrollo y la gran accesibilidad de programas a través de Internet, ha propiciado que muchos jóvenes incursionen en el mundo de los microcontroladores. Sin embargo, la falta de guía adecuada crea vicios en su proceder que deben ser corregidos en las aulas con el fin de lograr un desempeño profesional en los futuros ingenieros. Es por ello que en la asignatura de "Sistemas Digitales" nos hemos propuesto a enseñar cómo utilizar estructuras de programación más eficientes y robustas. En este sentido, dentro de la temática, se abordan estructuras tales como las máquinas de estados, las máquinas de eventos y las máquinas de tiempo [6,7]. Esta temática no es extensamente abordada en las publicaciones ni en los cursos de las universidades, sin embargo, son herramientas utilizadas en el ámbito profesional.

Por otro lado, las máquinas de estado, las máquinas de eventos y las máquinas de tiempo, al ser estructuras muy concretas, permiten al profesorado una evaluación más sistemática y realista del desempeño del estudiante.

El estudio de la máquina de tiempo parte de la definición de los conceptos de "período de repetición", "ranuras" y "tareas". Aunque la estructura de las máquinas de tiempo tiene semejanza a las estructuras de las máquinas de estados y las máquinas de eventos, es necesario redefinir conceptos para una cabal comprensión de su utilidad y aplicación.

Es necesario señalar que el uso de las máquinas de tiempo no excluye el uso de las máquinas de estado y eventos. Debe entenderse que son estructuras que pueden utilizarse simultáneamente en un sistema sin interferirse mutuamente, más bien todo lo contrario.

Para la enseñanza práctica de la asignatura de Sistemas Digitales en la Escuela de Ingeniería de Bilbao, se utiliza el lenguaje ensamblador de los procesadores PIC16 dado que

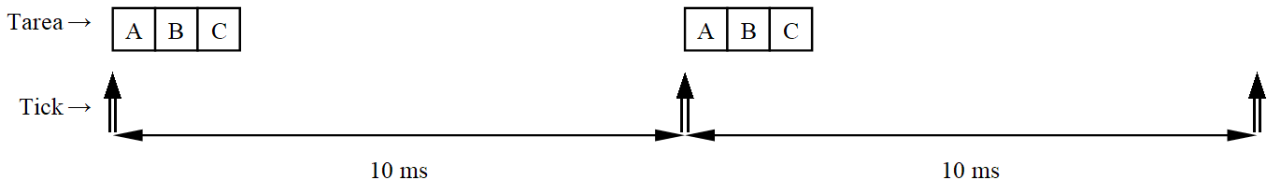


Fig. 1. Realización de 3 tareas en cada interrupción de tiempo (tick)

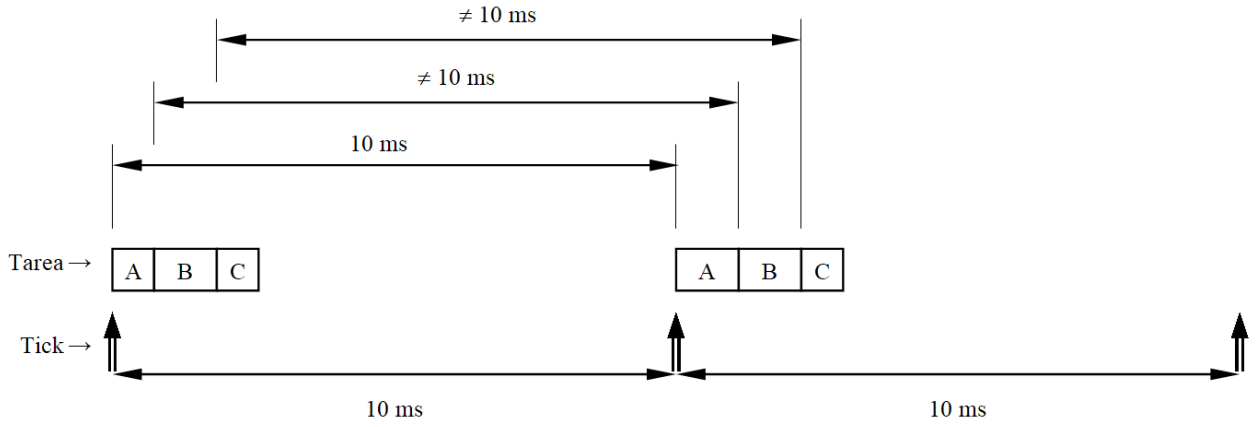


Fig. 2. Problema del incumplimiento de tiempo entre tareas

permite entender mejor el procesador desde una perspectiva de máquina electrónica [8,9,10]. Es cierto que la mayoría de los autores consideran que conceptos como la máquina de tiempo pertenecen al campo de los sistemas operativos y que éstos escapan de las posibilidades de los pequeños microcontroladores de 8 bits y en especial si se trabaja con lenguajes de bajo nivel [5, 11, 12]. Sin embargo, los conceptos básicos de los sistemas operativos se desarrollaron en procesadores de 8 bits y en lenguajes de muy bajo nivel. Además, en un lenguaje de bajo nivel se observa con una claridad especial la simplicidad de estas estructuras.

En sintonía con las prácticas, en este trabajo se exponen ejemplos de aplicaciones prácticas con procesadores PIC16, donde el uso de la máquina de tiempo permite superar, con creces, las limitaciones de los periféricos específicos del dispositivo en aplicaciones como el control de motores o servomotores.

II. Ejecución a tiempo

En los sistemas basados en procesadores se requiere con frecuencia atender ciertos dispositivos periódicamente con una relativa exactitud. Entre ellos se pueden citar los generadores de PWM, los generadores de sonido, los marcadores telefónicos.

Para atender este tipo de dispositivos, la mayoría de los microcontroladores cuenta con uno o más temporizadores y a veces con periféricos adicionales para algunos dispositivos en particular como pueden ser los generadores de PWM. En el caso de plataformas basadas en microprocesadores también es posible agregar periféricos adicionales. Sin embargo, no siempre es posible disponer de todos los periféricos requeridos o exactamente adaptados a la aplicación.

Muchas de estas aplicaciones pueden ser atendidas utilizando un temporizador y un programa debidamente desarrollado.

Hoy día los procesadores en general operan a elevadas frecuencias de reloj, por lo que son capaces de atender las exigencias que anteriormente se realizaban exclusivamente por circuitos específicamente diseñados. El mayor problema es el cumplir con la exactitud los requisitos de tiempo en que deben ejecutarse los programas.

Vamos a tratar de ilustrar los problemas y las soluciones por medio de ejemplos. Supongamos que se desean ejecutar 3 operaciones o tareas cada 10 ms. Estas tareas se denominarán *Tarea A, Tarea B y Tarea C*. Básicamente cada tarea es una subrutina. Entre la ejecución de dos *Tareas A* debe guardarse 10 ms de espacio de tiempo, al igual que entre dos *Tareas B* y dos *Tareas C*. Pero, sin embargo, la separación en tiempo entre las *Tarea A*, *B* y *C* no tiene porqué ser rigurosa.

Para cumplir con el requisito de tiempo es necesario que el procesador tenga asociado un temporizador que genere continuamente una interrupción cada cierto intervalo fijo de tiempo. Esta interrupción de tiempo, la principal del sistema, recibe el nombre de *tick*.

En el caso del ejemplo, una solución puede ser la de tener un *tick* de tiempo de 10 ms y ejecutar todas las tareas, una tras otra, tal y como se muestra en la fig. 1. El problema es que la duración de las tareas no siempre suele ser la misma, con lo cual se presenta el problema de que no existe un intervalo

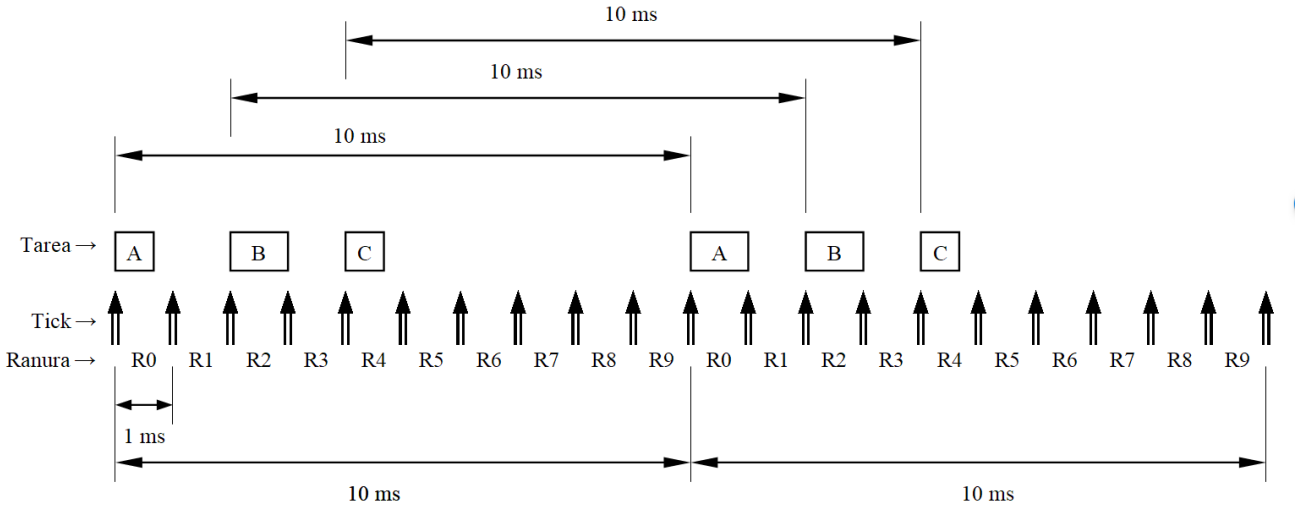


Fig. 3. Distribución de 3 tareas en una máquina de tiempo de 10 ranuras.

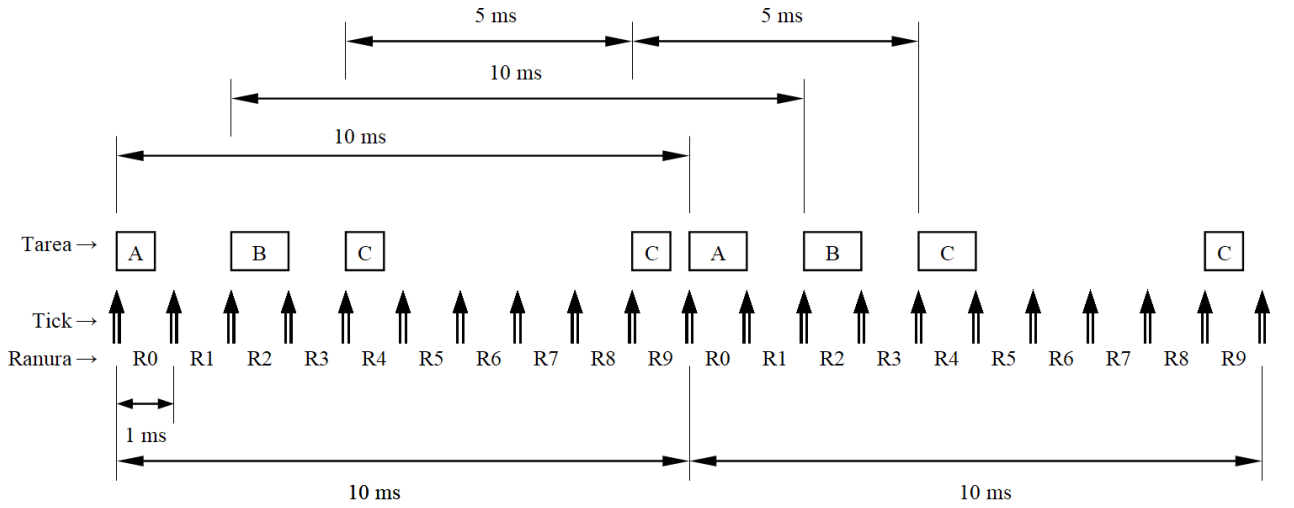


Fig. 4. Distribución de 3 tareas en una máquina de tiempo de 10 ranuras con la tarea C a distinto período.

de tiempo determinado y constante entre las *Tareas B* y entre las *Tareas C*, tal y como se muestra en fig. 2.

III. Máquinas de tiempo

La máquina de tiempo es una estructura de programación que permite la administración de tareas que deben ser ejecutadas en intervalos de tiempo precisos. Se utiliza cuando es necesario efectuar varias operaciones periódicas con cierto grado de precisión en el tiempo.

En el concepto de máquina de tiempo, se utilizan *ticks* de mayor frecuencia y en ellos se distribuyen las tareas. Siguiendo con el ejemplo, el período de repetición de 10 ms se trocea en 10 intervalos de 1 ms cada uno. A estos intervalos los denominaremos "*ranuras de tiempo*". Esto se traduce en hacer que las interrupciones de tiempo sean cada 1 ms y atender esas interrupciones por un administrador: la máquina de tiempo. De esta manera cada una de las tareas se puede realizar en una ranura de tiempo específica, tal y como se muestra en la fig. 3. En la misma figura se observa que ahora sí se cumplen los requisitos temporales entre las tareas.

Para este ejemplo se ha decidido dividir el período de repetición en 10 ranuras, y por tanto pudieran ubicarse hasta 10 tareas en las distintas. Obviamente, mientras mayor sea la densidad de ranuras por período de repetición, mayor será la carga sobre el procesador y se restará capacidad de procesamiento al lazo principal.

En esta estructura de ranuras del ejemplo, pudiera existir una tarea que se deseara ejecutar con una mayor periodicidad. Supongamos, por ejemplo, que la *Tarea C* se quiera ejecutar cada 5 ms. Para ello se asignará dicha tarea en dos de las 10 ranuras como se observa en la fig. 4.

La construcción de una máquina de tiempo por programa es muy parecida a una máquina de estados y se ejecuta como rutina de atención en la interrupción del temporizador fig. 5. El diagrama de flujo de la máquina de tiempo para el ejemplo que se viene utilizando, se muestra en la fig.

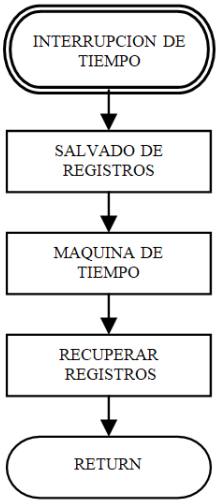


Fig. 5. La máquina de tiempo se ubica en la rutina de atención de interrupciones del temporizador.

6. Obsérvese la semejanza con una *máquina de estados*, la diferencia fundamental está en que el concepto de "estado" se transfigura en el concepto de "ranura de tiempo" y que el número de la ranura de tiempo se actualiza dentro de la misma máquina de tiempo.

La codificación de las máquinas de tiempo varía de un procesador a otro o de un lenguaje de programación a otro. Sin embargo, la implementación puede hacerse con gran eficiencia en la mayoría de los procesadores. Para mantener una perspectiva electrónica en las aulas, nosotros utilizamos el lenguaje ensamblador de los procesadores PIC16 y la codificación de la máquina de tiempo en ensamblador sobre estos procesadores se muestra en la fig. 7.

Este mismo ejemplo nos sirve para hacer un cálculo aproximado de la carga que tiene la máquina de tiempo sobre el procesador. Suponiendo un PIC16 con un ciclo de máquina de 1 us, la máquina de tiempo se ejecuta en aproximadamente 10 us. El salvado y recuperación de registros por interrupción supone, en conjunto, unos 30 us. Esto significa que con una interrupción de 1 ms, la máquina de tiempo representa una carga de un 4%.

IV. Control de motores por PWM

Para seguir ilustrando la aplicación de las máquinas de tiempo, vamos a suponer que se desea controlar independientemente la velocidad de cuatro motores DC con un procesador PIC16F887 (Fig. 8). Este procesador dispone de dos periféricos específicos para generar hasta 2 señales PWM con una resolución de 10 bits, por lo que no podríamos gobernar los cuatro motores independientemente. El uso de la máquina de tiempo permite controlar varios motores mediante PWM utilizando salidas digitales convencionales (GPIO).

En nuestro caso, por simplicidad, vamos a suponer que se controlan los motores a 4 niveles de velocidad, correspondientes a una modulación PWM al 0%, al 33.3%, al 66.7% y al 100%. El período de la señal de control a utilizar será de 1.5 ms (667 Hz).

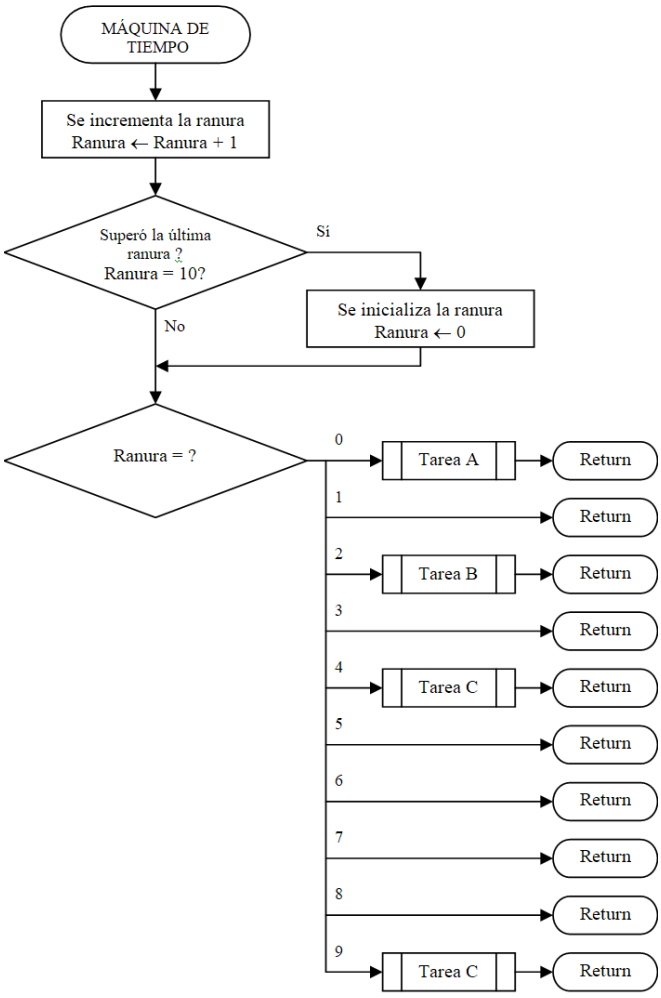


Fig. 6. Diagrama de flujo de una máquina de tiempo.

El número mínimo de ranuras que se requieren para controlar los motores viene dado por la ecuación:

N_Ranuras = N_Motores x (N_Niveles - 1)

Dado que para este ejemplo se tienen 4 motores y 4 niveles de modulación, la máquina de tiempo tiene que tener un mínimo de 12 ranuras que serán barridas en un período de repetición de 1.5 ms. En la fig. 9 se pueden observar las señales para los cuatro motores, suponiendo diferentes modulaciones en cada uno de ellos. Obsérvese cómo existe un desfase en el inicio de las señales debido al posicionamiento de las tareas en las ranuras.

Dado que las 12 ranuras deben ser distribuidas en un período de 1,5 ms, las ranuras deben ser ubicadas cada 125 us, es decir, la interrupción del temporizador que llama a la máquina de tiempo deberá ser de 125 us.

La rutina para fijar la velocidad de cada motor (MOTOR_n), mostrada en la fig. 10, se utilizará en el programa principal, fuera de la interrupción. Con esa rutina se asigna la velocidad (0, 1, 2 o 3) a la variable correspondiente.

Las tareas que deben instalarse en la máquina de tiempo

```
;*************************************************************
; Máquina de tiempo

MAQTIE:
        INCF    Ranura,F    ; Se actualiza ranura de tiempo
        MOVLW   d'10'       ; Se verifica que no haya superado el
        XORWF   Ranura,W    ;  valor máximo de ranuras
        BTFSC   STATUS,Z    ;
        CLRF    Ranura      ;  en caso contrario se inicializa
        MOVF    Ranura,W    ; Se toma el número de ranura
        ADDWF   PCL,F       ; Se salta a la ranura correspondiente
        GOTO    TAREA_A     ; Ranura 0: Tarea A
        RETURN              ; Ranura 1: Ranura vacia
        GOTO    TAREA_B     ; Ranura 2: Tarea B
        RETURN              ; Ranura 3: Ranura vacia
        GOTO    TAREA_C     ; Ranura 4: Tarea C
        RETURN              ; Ranura 5: Ranura vacia
        RETURN              ; Ranura 6: Ranura vacia
        RETURN              ; Ranura 7: Ranura vacia
        RETURN              ; Ranura 8: Ranura vacia
        GOTO    TAREA_C     ; Ranura 9: Tarea C

TAREA_A:                    ; Tarea A
                ; Programa de tarea A
        RETURN

TAREA_B:                    ; Tarea B
                ; Programa de tarea B
        RETURN

TAREA_C:                    ; Tarea C
                ; Programa de tarea C
        RETURN
```

Fig. 7. Codificación de una máquina de tiempo para procesadores PIC16.

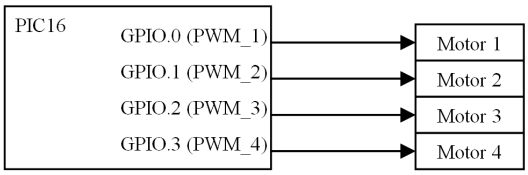


Fig. 8. Procesador PIC16 con los 4 motores a controlar.

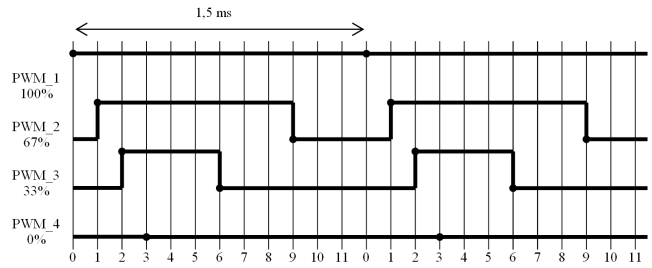


Fig. 9. Dos períodos de las señales de control de los motores (La actuación de la máquina de tiempos se simboliza con un punto).

(GENMI_n y GENM_n) son de la forma presentada en los diagramas de flujo de la fig. 11. La primera tarea (GENMI_n) reinicia el valor del contador de ancho de pulso para cada período de repetición. El diagrama de la máquina de tiempo se visualiza en la fig. 12.

Suponiendo nuevamente un PIC16 con un ciclo de máquina de 1.0 us, la máquina de tiempo con las respectivas tareas de control de motores representa una carga de aproximadamente un 50%. Esta carga de trabajo depende de la complejidad de las tareas ubicadas en la máquina de tiempo, aunque como se observa son tareas relativamente simples. Por ello, la variable

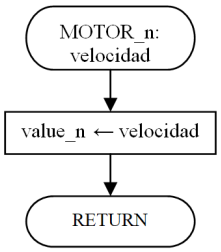


Fig. 10. Rutina de fijación de velocidad para el motor "n".

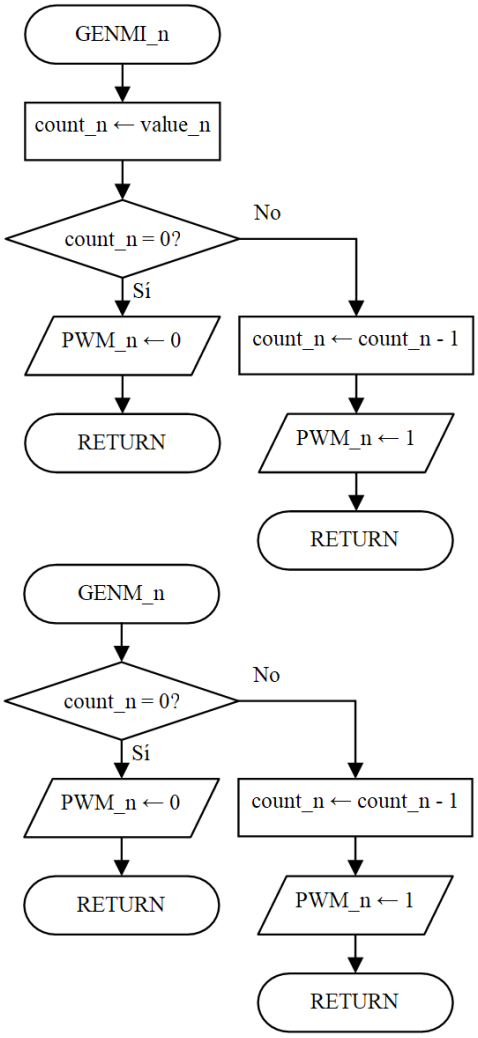


Fig. 11. Diagrama de flujo de las tareas que deben ser llamadas desde la máquina de tiempo de control de los motores.

que influye más significativamente en la carga de trabajo es la duración del período de cada ranura, en este caso, 125 us.

V. Control de servos por PWM

Otra aplicación muy idónea y popular para la máquina de tiempo es el control de servomotores o servos [13]. Estos dispositivos son muy utilizados en robots y su control se lleva

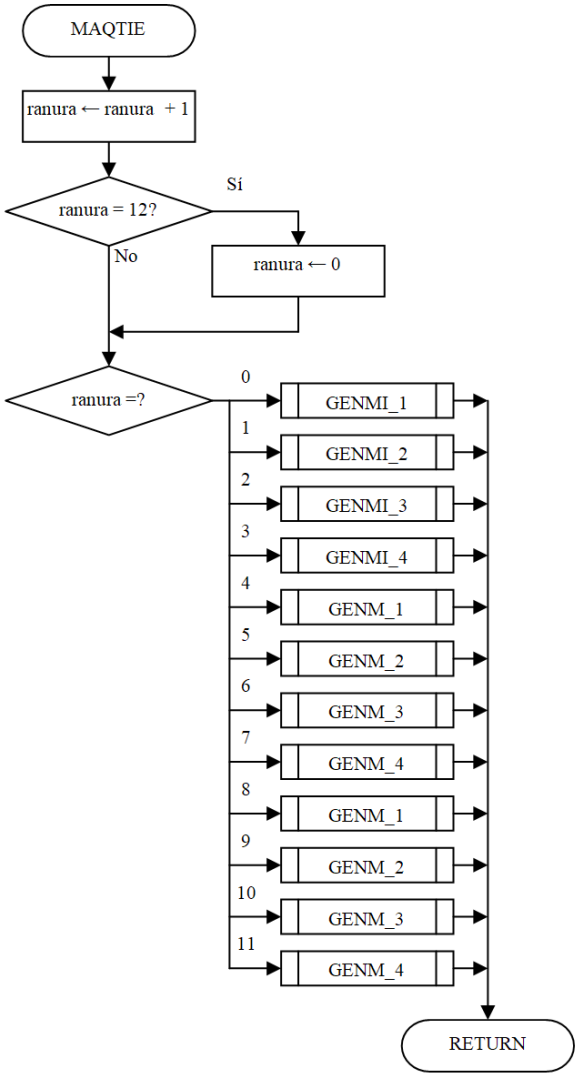


Fig. 12. Diagrama de flujo de la máquina de tiempo de control de motores.

a cabo con una señal PWM. Un coche-robot puede requerir un par de servos, un avión radio-controlado unos 5 o 6, y un robot humanoide unos 8. Por lo que un microcontrolador como el PIC16F887 comentado anteriormente, pudiera resultar descartado si se recurre a sus dos periféricos PWM. El uso de la máquina de tiempo en el mismo microcontrolador puede controlar sin problemas más de 8 servos.

Estos servomotores son controlados por una señal PWM con un período de 20 ms. El ancho del pulso puede variar desde 1 ms (brazo a 0º) hasta 2 ms (brazo a 180º) tal y como se representa en la fig. 13. Señales de estas características no pueden ser generadas por los periféricos específicos para PWM en los procesadores PIC16F887. Por ello, la única solución es el uso de la máquina de tiempo.

En este caso, el número de ranuras requeridas debe calcularse de manera diferente porque la señal a generar tiene requisitos temporales muy específicos. Es necesario partir de la resolución requerida en el movimiento de los servomotores. Supongamos que se desea una resolución de 18º en el giro

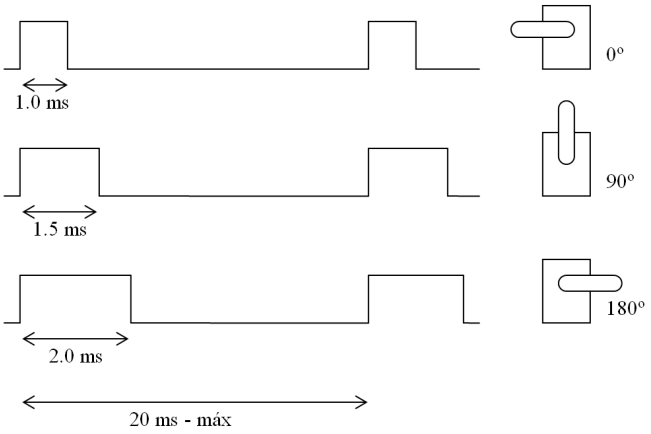


Fig. 13. Señal de control de servomotores.

de los mismos. El tiempo de cada ranura para obtener tal resolución es:

T_Ranura =

(Tmax_Pulso - Tmin_Pulso) x Resolución / 180º

T_Ranura = (2ms - 1ms) x 18º / 180º = 100us

El número total de ranuras es ahora dependiente del período total de la señal y del tiempo de ranura:

N_Ranuras = T_Total / T_Ranura

N_Ranuras = 20ms / 100us = 200 ranuras

A diferencia del caso anterior del control de motores, para los servos es imperativo que cada 20 ms se presente un pulso de por lo menos 1 ms. Por ello, la tarea de inicio del pulso GENSI_n es distinta (fig. 14).

Hay diferencias también en la distribución de las tareas en la máquina de tiempo (Fig. 15). Como el ancho mínimo del pulso es de 1.0 ms, una vez inicializado el pulso no debe ser controlado hasta la ranura 9. Además como el máximo ancho de pulso debe ser de 2.0 ms, las ranuras en que debe utilizarse la rutina GENS_n son las comprendidas entre la 9 y la 19.

Como se puede observar en la fig. 15, se encuentran libres las ranuras 1 a 8 y las ranuras 20 a 199. Éstas pueden ser utilizadas para controlar otros servos adicionales. En total, con esta máquina de tiempo es posible controlar 10 servomotores con una carga de trabajo del orden de 50% para un procesador PIC16 con un ciclo de máquina de 1 us.

VI. Control de tareas mixtas

En los ejemplos anteriores se ha utilizado la máquina de tiempos para controlar un único tipo de dispositivo: motores o servos. Sin embargo, en una misma máquina de tiempo pueden convivir tareas de diferentes dispositivos. Por ejemplo: motores o luces controladas por PWM, servomotores, reloj de tiempo real, etc.

Supongamos que deseamos controlar con una máquina de tiempo dos servomotores y dos motores. Para simplificar el ejemplo se controlarán los motores a 3 niveles de velocidad

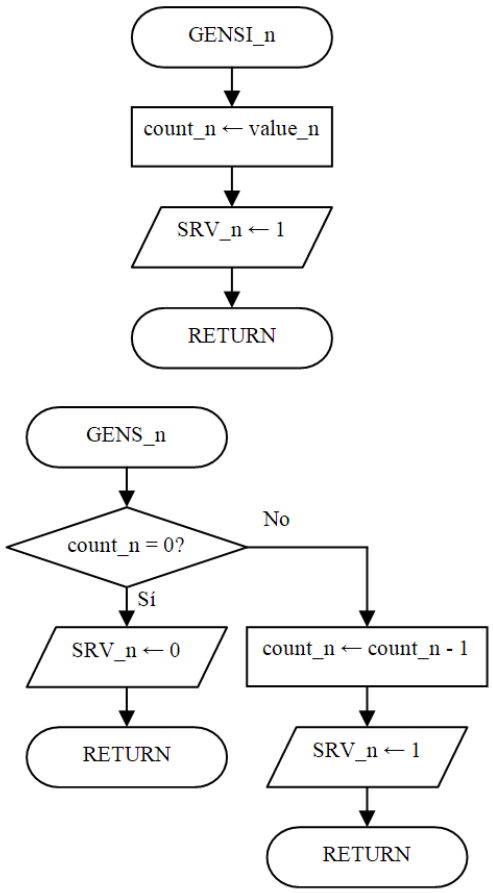


Fig. 14. Diagrama de flujo de las tareas que deben ser llamadas desde la máquina de tiempo de control de los servomotores.

(0%, 50% y 100%), es decir, se requiere el uso de 2 ranuras por período para cada motor.

La señal de período más largo es la correspondiente a los servomotores, y es la que marca el período total de la máquina de tiempo, es decir 20 ms. Esto significa que si sólo se posicionan 2 ranuras en todo el período, la frecuencia de control de los motores será de 50 Hz (20 ms). Esta frecuencia puede resultar muy baja para un control adecuado. Por ello, y dado que disponemos de muchas ranuras libres, se distribuirán uniformemente las dos ranuras de cada motor por todo el conjunto de ranuras. En este caso es posible asignar cinco pares de ranuras para cada motor por lo que la frecuencia de control aumenta a unos, más razonables, 250 Hz (5 x 50 Hz).

En la Tabla 1 se observa la distribución de tareas en la máquina de tiempo para el ejemplo mixto propuesto. De esta tabla, se deduce que aún queda espacio para el control de varios dispositivos sin afectar sus funciones. Por ejemplo, pudiera utilizarse una ranura para la actualización del reloj de tiempo real del sistema cada 20 ms.

VII. Conclusiones

La máquina de tiempo es una estructura de programación muy sencilla que permite hacer un uso muy eficiente de las posibilidades de pequeños procesadores que operan a velocidades respetables aún en sus versiones más económicas.

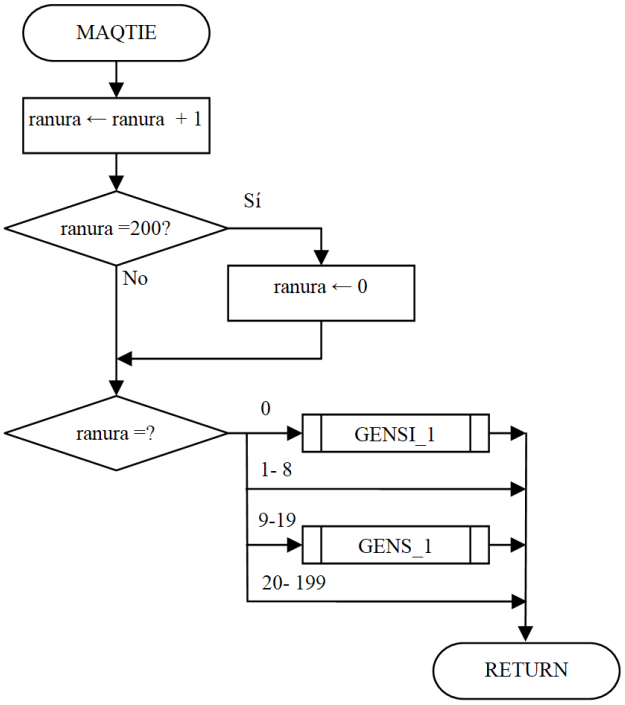


Fig. 15. Diagrama de flujo de la máquina de tiempo de control de un servomotor.

TABLA I
ISTRIBUCIÓN DE TAREAS EN LA MÁQUINA DE TIEMPO PARA CONTROLAR 2 SERVOMOTORES Y 2 MOTORES.

Ranura	Tarea
0	Servo GENSI_1
1	Motor GENMI_1
2	Motor GENMI_2
9-19	Servo GENS_1
20	Servo GENSI_2
21	Motor GENM_1
22	Motor GENM_2
29-39	Servo GENS_2
41	Motor GENMI_1
42	Motor GENMI_2
61	Motor GENM_1
62	Motor GENM_2
81	Motor GENMI_1
82	Motor GENMI_2
101	Motor GENM_1
102	Motor GENM_2
121	Motor GENMI_1
122	Motor GENMI_2
141	Motor GENM_1
142	Motor GENM_2
161	Motor GENMI_1
162	Motor GENMI_2
181	Motor GENM_1
182	Motor GENM_2

Como se ha podido ver a través de los ejemplos expuestos en el presente trabajo, el uso de la máquina de tiempo permite extender la capacidad de control de los procesadores por encima de lo que se pudiera prever de sus especificaciones comerciales.

Pero quizás, la ventaja más importante desde el punto de vista docente, radica en ayudar a formar nuevos conceptos de programación que servirán de base a cursos avanzados de programación. Todo esto sin perder la perspectiva de la máquina electrónica que es un microcontrolador.

Por otro lado, para el profesor que dirige el curso, el uso de estructuras como la máquina de estados y eventos y la máquina de tiempo, permite una evaluación más concreta y objetiva del progreso de los estudiantes. Además, el conocimiento de estructuras profesionales claras, permite que los estudiantes puedan aprender a trabajar en ambientes colaborativos donde la forma de trabajo está muy reglada en el aspecto de la integración de bloques de programa. Aspecto éste que es muy remarcado con los actuales programas de estudio formulados en base a competencias [14].

AGRADECIMIENTOS

El trabajo descrito en esta publicación ha sido generado y patrocinado por el Departamento de Educación, Política Lingüística y Cultura del Gobierno Vasco en base a las ayudas para apoyar las actividades de grupos de investigación del sistema universitario vasco IT978-16 y por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto de investigación TEC2017-84011 y los fondos FEDER.

REFERENCIAS

[1] BOPV. RESOLUCIÓN de 20 de diciembre de 2010, de la Vicerrectora de Ordenación Académica, de la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea, por la que se procede a la publicación del plan de estudios del Grado en Ingeniería Técnica de Telecomunicación de la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea. Boletín Oficial del País Vasco, nº 44 de 4 de marzo de 2011.

[2] "Planificador" Wikipedia, 2018. [En línea] Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Planificador [Accedido: 26/04/2018].

[3] R. Tocci, N. Widmer, *Sistemas digitales: principios y aplicaciones*. Mexico: Prentice Hall, 2003.

[4] "Scheduling (computing)" Wikipedia, 2018. [En línea] Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Scheduling_(computing) [Accedido: 26/04/2018].

[5] O. González, "Sistemas operativos en microcontroladores. Seminario de Microrrobots" Universidad de Alcalá, 2006. [En línea] Disponible en: http://www.alcabot.com/alcabot/seminario2006/SEM06_SOenMicrocontroladores.pdf [Accedido: 26/04/2018].

[6] A. Zuloaga, A. Astarloa, *Sistemas de procesamiento digital*, Madrid: Delta Publicaciones, 2008.

[7] J. Jiménez, C. Cuadrado, I. Kortabarria, J. Andreu, A. Zuloaga, "Dificultades al aprender a especificar máquinas de estados en sistemas microprogramados," , pp. 428-432, XII Congreso de Tecnologías, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (TAEE 2016), Sevilla (España), Junio 22-24, 2016.

[8] A. Zuloaga, *Laboratorio de Sistemas Digitales*, Bilbao: Publicaciones de la Escuela de Ingeniería de Bilbao, 2013

[9] A. Zuloaga, A. Astarloa, *Sistema Digital PICTOR*, Bilbao: Servicio de publicaciones de la Escuela de Ingeniería de Bilbao, 2013

[10] A. Zuloaga, J. Jiménez, I. Kortabarria, J. Andreu, " PICTOR: circuito impreso para montar un sistema digital básico," , pp. 315- 319, XI Congreso de Tecnologías, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (TAEE 2014), Sevilla (España), Junio 11-13, 2014.

[11] E. García, *Compilador C CCS y Simulador Proteus para Microcontroladores PIC*, México: Alfaomega grupo editor, 2008.

[12] T. Wilmshurst, *Designing Embedded Systems with PIC Microcontrollers.* Londres: Elsevier. 2007

[13] "Servomotor ¿Que es y como funciona?", Ingeniería mecafenix, 2018. [En línea] Disponible en: http://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/servomotor/ [Accedido: 04/02/2018].

[14] BOE. Orden CIN/352/2009, de 9 de febrero, por la que se establecen los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico de Telecomunicación, 20 de febrero de 2009.

La Motivación en el Aprendizaje de la Electrónica como Mejora de la Calidad de la Educación.

P. Ruiz-de-Clavijo, J. Juan, F. Sivianes, M. Hernández, P. Fortet
E.T.S.Ingeniería Informática, Dpto. Tecnología Electrónica - Universidad de Sevilla, Sevilla 41012, Spain
paulino@dte.us.es, jjchico@dte.us.es, sivianes@dte.us.es, marilohv@dte.us.es, fortet@us.es

***Abstract*—La educación racional debe complementarse con la educación emocional (motivación), en ésta, podemos destacar sus factores motivacionales como son: la activación de la curiosidad y del interés, el facilitar el aprendizaje de las estructuras de conocimiento, de los mapas conceptuales, de los problemas integradores, así como una presentación global al finalizar el curso, que facilitan el aprendizaje, el trabajo en grupo (colaborativo) y permiten que obtengamos buenos resultados en nuestras evaluaciones de los estudiantes.**

Keywords—motivación, aprendizaje, calidad de la educación.

I. INTRODUCCIÓN

Ante el alto índice de suspensos en los primeros cursos de ingeniería, en particular en las asignaturas de Electrónica nos obliga a buscar formas nuevas de motivar a nuestros estudiantes en el aprendizaje.

Tradicionalmente se distinguen dos tipos de inteligencias [5][6][9]: la racional y la emocional, en el siglo XX predominó lo racional (objetivo) y en el siglo XXI se empiezan a tener en cuenta las emociones (subjetivo) que facilitan, a su vez el pensamiento. El procesamiento de la información por parte del cerebro nos lleva al conocimiento, donde juegan un papel importante: la percepción, la memoria, el aprendizaje, el racionamiento y las emociones (motivación).

La principal aportación de la educación emocional es la reducción del estrés en el alumnado, las familias y los docentes. Sin dicho estrés aumenta la capacidad retentiva de los estudiantes, su motivación y su atención, al ser capaces de escuchar de forma activa respetando su estructura cognitiva, lo que les hace avanzar en competencias. Como diría Rafael Mora, reconocido pionero en Neuroeducación: "*solo se aprende lo que se ama*". Las dos grandes carencias emocionales son: por un lado la cada vez menor capacidad de atención y por otro, la falta de motivación o curiosidad por aprender. Alma Serra [10] advierte que aprender a través de la propuesta en que el alumno es un mero contenedor de información y el docente un instructor que ejerce su autoridad sin tener en cuenta los procesos emocionales, genera estrés que afecta a áreas el cerebro como el hipocampo, el cual se encarga de la memoria a corto plazo.

Por otra parte cuando el estudiante se siente respetado, motivado y disfruta de lo que aprende, su organismo genera dopamina, serotonina o endorfinas, hormonas asociadas a la felicidad, por lo que aprende mejor, retiene más información y asocia a mayor velocidad. Por eso es tan importante escuchar al alumno, motivarlo y ayudarlo en la construcción del propio conocimiento.

Para facilitar que los alumnos se interesen y que se esfuercen para comprender y aprender, diversos investigadores han estudiado los factores motivacionales [8] como son:

1. Activar la curiosidad: plantear información nueva y plantear objetivos globales.
2. Activar y mantener el interés: al tener en cuenta los conocimientos previos, planteando los conceptos de forma clara, jerarquizada, cohesionada, haciendo buenas ilustraciones y ejemplos, con un buen texto narrativo.
3. Facilitar las actividades de aprendizaje: al plantear dudas para que pregunten los estudiantes, escuchando y haciéndose eco de las respuestas, subrayando el progreso en el aprendizaje y aprendiendo de los errores. Por otra parte explicar procedimientos y estrategias para aprender, planteando problemas relevantes que muestren la utilidad del aprendizaje.
4. Facilitar la interacción: al proponer trabajos colaborativos que impliquen cooperación, buena organización y la exposición de los trabajos.
5. Efectuar una buena evaluación: Dar a conocer previamente los criterios de calificación procurando que sean lo más objetivos posibles, incluyendo tareas de dificultad variable para facilitar a todos un cierto éxito, dando información a los alumnos de cómo superar a las dificultades .

II. METODOLOGÍA DE APRENDIZAJE

En la primera parte de la metodología nos vamos a centrar en la educación racional y en la segunda parte en la emocional.

Para el buen desarrollo de los procesos formativos, sobre todo en educación racional en el espacio europeo de educación superior se precisa definir las competencias que pueden considerarse como el conjunto de conocimientos, capacidades, estrategias, destrezas, actitudes y valores que facilitan un buen desempeño profesional en su aspecto científico, técnico y ético.

En el informe de la UNESCO [1] se plantean cuatro aprendizajes fundamentales:

1. Aprender a conocer: es decir adquirir los instrumentos de la comprensión y el saber para desarrollar las capacidades profesionales, ahondando en la comunicación con los demás.
2. Aprender a hacer: es decir, poner en práctica los conocimientos adquiridos, adaptándolos al futuro mercado de trabajo, haciendo hincapié en las tareas de diseño y manejo de las tecnologías más idóneas en cada caso para la solución de los problemas.
3. Aprender a vivir con los demás: en la que se potencia los proyectos colaborativos entre diferentes participantes y en que obtienen un beneficio de trabajar en común.
4. Aprender a ser: la educación debe contribuir al desarrollo global de cada persona tanto el cuerpo como la mente. Todo individuo debe tener pensamiento autónomo y crítico para comportarse con responsabilidad como futuro profesional.

En el proceso de aprendizaje se deben definir de forma clara las competencias, que a parte del desarrollo personal o profesional, deben buscar la disminución de las desigualdades y el aumento del respeto humano.

En la formación se debe tener en cuenta como bajo formas diversas se encierran verdades parecidas, por otra parte hay frases que tienen más valor que otras y que en las propias palabras hay parte de la información.

Aprender es la capacidad cognitiva que nos sirve para adquirir nuevos conocimientos. Es muy importante en el proceso de aprender definir los núcleos de información (palabras generadoras de Paulo Freire [4] o los núcleos escénicos de Angel Facio [2]) que son las ideas básicas o los hechos relevantes que por deducción, analogía, reflexión y creatividad son generadoras de nuevos conocimientos.

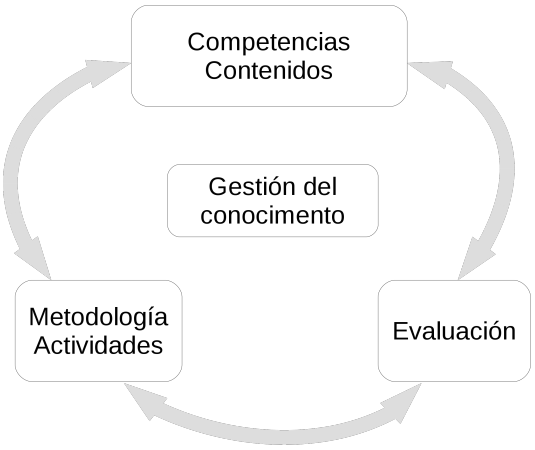


Fig. 1. Gestión del conocimiento.

Se debe expresar lo que se quiere comunicar para que se aprenda por el medio de comunicación más idóneo (sistemas multimedia).

Proceso formativo [3]: Para definir el proceso formativo usaremos el modelo de desarrollo de la figura 1 en el que podemos distinguir cuatro aspectos:

1. Competencias/contenidos.
2. Metodología/actividades.
3. Evaluación.
4. Gestión del conocimiento.

El proceso formativo es totalmente interactivo y la evaluación sirve como realimentación para mejorar el proceso, así como la gestión del conocimiento interactúa con todo para mejorar la calidad.

A. Competencias / contenidos

En todo proceso de aprendizaje se tienen que identificar los conocimientos necesarios para el desarrollo de proyectos, usando los modelos más idóneos y la realización tecnológica más apropiada en los diferentes ámbitos.

Para aprender las teorías que se aplican a los diferentes sistemas, vamos a ahondar en la génesis de las mismas.

B. Métodos/actividades

Para motivar es preciso ver que se va aprendiendo progresivamente poniendo ejemplos de sistemas reales y analizando el proceso de diseño de los diferentes subsistemas. En un buen sistema de aprendizaje es necesario saber los conocimientos previos de los que parten los alumnos, fijándonos en lo que conocen, analizando los exámenes, problemas y prácticas.

Si queremos un aprendizaje significativo es necesario hacer reflexionar al estudiante haciéndole preguntas para llegar a las verdades (método socrático) y de esta forma que construya su propio conocimiento propiciando el análisis, la síntesis y la evaluación de las diferentes alternativas que plantean los diferentes proyectos.

El aprendizaje de las teorías y conceptos, como se ha visto anteriormente se realiza con la participación reflexiva de los alumnos ante las diferentes teorías que plantea el profesor, ampliando sus conocimientos, usando la WEB, los libros de texto de biblioteca, los libros “on-line” y el material educativo que proporcione el profesor.

Los problemas se proponen a los alumnos para que los hagan en casa aplicando la teoría y los conceptos explicados, resolviéndolos posteriormente en clase orientados por el profesor. En las prácticas se aplican las teorías, los modelos y conceptos estudiados, debiendo realizar el alumno un estudio teórico y comprobar posteriormente los resultados mediante las medidas pertinentes. El profesor se los entregará corregidos para aprender de los errores y también para ver el proceso de aprendizaje, a la vez que motiva en el mismo.

Otro aspecto a promover es el de proyectos colaborativos mixtos entre varios alumnos y alumnas propiciando la igualdad. Valorándose su redacción escrita y su exposición oral ya que representa un beneficio mutuo por su aprendizaje en común.

Por otra parte, se maneja la interdisciplinariedad buscando ejemplos y prácticas de asignaturas afines y comentando los enfoques diversos. Esto facilitará la transferencia de conocimientos a otros contextos.

C. Evaluación

La evaluación está muy relacionada con las competencias y los contenidos, con la forma de aprender y sirve como realimentación para verificar si el proceso formativo es de calidad. Se deben facilitar los trabajos, prácticas y proyectos corregidos para así poder aprender de los errores cometidos.

Vamos a profundizar en los diferentes aspectos de la evaluación como son el criterio usado, el instrumento de medida y la ponderación. La forma de evaluar es fundamental en el proceso de aprendizaje y el alumno debe conocerla a principio de curso. Por ello, la mejor forma de evaluar en competencias es que el alumno desarrolle un proyecto, para ver como lo consigue comprender y diseñarlo movilizando los conocimientos adquiridos.

Los instrumentos de evaluación empleados no pueden restringirse a pruebas para ver el grado de dominio de contenidos, sino evaluar los resultados de acuerdo con las competencias, por tanto se precisa desarrollar proyectos para los que se necesita manejar conocimientos, capacidades, actitudes, destrezas, estrategias y valores.

Una evaluación continua buena tiene su efecto motivador: estamos aprendiendo bien, mientras que una baja si sabemos los errores que cometemos nos sirve para mejorar nuestro aprendizaje.

D. Gestión del conocimiento.

Gestionar el conocimiento supone la capacidad que debemos ir adquiriendo progresivamente para captar la información significativa, catalogándola, referenciándola y archivándola de forma estructurada para una fácil recuperación y reusabilidad posterior y su integración, y así, convirtiéndola en conocimiento para uso de estudiantes, docentes y graduados. También supone gestionar de forma eficaz no sólo los conocimientos, sino las actividades y la evaluación, de esta forma se mejora la calidad del proceso formativo.

En lo que respecta a la educación emocional (la motivación) nos debemos preguntar: ¿qué hacer para motivar a mis estudiantes? En general hay una falta de interés por los contenidos, los consideran aburridos y poco útiles para el desarrollo profesional. Por todo eso, se debe presentar la asignatura de forma sugerente, haciendo especial hincapié en la utilidad para las siguientes asignaturas, así como en sí misma, mostrando que lo que se enseña sirve para la labor profesional. Se debe tener todo esto en cuenta en la presentación de la asignatura.

Es muy importante facilitar las estructuras básicas de la asignatura para poder aprender por analogía y afianzar los conocimientos, con lo que el alumno gana en autoestima. Una de las formas de incentivar es el aprendizaje visual mediante el mapa conceptual ya que es uno de los mejores métodos para enseñar habilidades de pensamiento como son: ayudar a pensar con claridad, elaborar, organizar y presentar. Los mapas conceptuales revelan modelos, interrelaciones e interdependencias, que estimulan el pensamiento creativo y crítico.

El aprendizaje no debe ser memorístico, sino se deben comprender los conceptos (las ideas), los principios (las leyes), las teorías y los modelos, así como su integración en sistemas más complejos que están constituidos por subsistemas. De ahí que solucione el alumno problemas integradores, que le sirvan para asimilar las teorías y ganar en autoconfianza.

Es muy importante hacer al final de curso un resumen global e integrador por bloques temáticos, complementario al de la presentación inicial, teniendo en cuenta las relaciones (estructura) y presentando los errores más comunes cometidos en las prácticas.

Vamos a analizar las razones que afectan al interés y dedicación al trabajo académico, por eso vamos a contestar a la pregunta: ¿ Porqué trabajan mis alumnos?

a) Deseo de dominio y experiencia de competencia.

b) Deseo de aprender algo útil.

c) Deseo de conseguir recompensas.

d) Necesidad de seguridad que da el aprobado.

e) Necesidad de preservar la autoestima.

f) Necesidad de autonomía y control personal.

III. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE APRENDIZAJE A TECNOLOGÍA DE COMPUTADORES.

Tecnología de Computadores es una asignatura de 2º curso de Grado en Ingeniería Informática, de la especialidad Tecnología de Computadores con 6 créditos ECTS y 40 alumnos. En esta asignatura, después del aprendizaje racional nos vamos a centrar en varios aspectos del aprendizaje emocional (motivación) [7][8].

Para saber los conocimientos previos y el interés que presentan los alumnos por la asignatura vamos a plantear la siguiente encuesta:

1. ¿Qué es la tensión? ¿qué es la intensidad? ¿qué es la impedancia? ¿cómo se expresa y que significa la ley de Ohm ?
2. ¿Qué interés presenta esta asignatura en la escala de 0 a 10 ?
3. ¿Qué te gustaría que te explicaran en Tecnología de Computadores?
4. ¿Cuántas asignaturas te quedan del curso anterior?
5. ¿Procedes de formación profesional, bachillerato u otros ?
6. ¿Hombre o Mujer?
7. ¿Eres repetidor?

Para realizar la evaluación se propone una calificación en la escala de 0 a 10 aplicando los siguientes pesos a las partes indicadas:

- Teoría, problemas y proyectos: 70%.
- Mapas conceptuales: 5%.
- Prácticas: 25 %.

Para activar la curiosidad se realiza una presentación al comenzar el curso donde se abordarán los siguientes bloques temáticos:

1. Funcionamiento lineal y no lineal de los diodos.
2. Amplificación y conmutación en transistores BJT.
3. Amplificación y conmutación en transistores MOSFET.
4. Operaciones AND, OR, NAND y NOR en las familias lógicas.
5. Lectura y escritura en memorias RAM y su capacidad.
6. Aplicación a los ordenadores.

Para mantener el interés es importante relacionar los conceptos buscando las estructuras de conocimiento, que en Tecnología de Computadores son: el dispositivo que tiene unas formas de operación que se representan a través de modelos, y los circuitos que tienen su comportamiento.

Para activar y mantener el interés en un discurso jerarquizado y cohesionado se deben realizar los mapas conceptuales, que contabilizarán en la evaluación. Concretamente se generan los siguientes mapas conceptuales:

1. Diodos.
2. Transistores BJT.
3. Transistores MOSFET.
4. Familias lógicas.
5. Memorias.

Para relacionar conceptos y modelos, y de esta forma profundizar en el conocimiento generando autoestima se desarrollan los problemas integradores siguientes:

- La fuente de alimentación está constituida por los subsistemas: transformador, puente de diodos, filtro y regulador.
- El transistor BIFET en amplificación que está construido por un amplificador BJT y por un amplificador MOSFET.
- El diseño de puertas NAND y NOR usando transistores N-MOS y P-MOS.

Finalmente presentaremos un resumen de toda la asignatura que nos sirve para aclarar y sintetizar los conceptos, las leyes y los modelos, así como los circuitos más relevantes, y comentar los errores más comunes cometidos en las prácticas, con lo que motivamos al alumno al darle una visión global de la asignatura.

Empezamos visualizando los bloques temáticos: diodos, transistor bipolar, transistor MOSFET, familias lógicas y memorias. Para los diodos vemos el funcionamiento como dispositivos con los tres zonas de operación. directa, corte y Zener, como circuito y dependiendo de la excitación trabaja en forma lineal (pequeña señal) o no lineal (gran señal) y sus aplicaciones principales son los rectificadores, los limitadores y el regulador de tensión.

En cuanto a las prácticas si los estudiantes realizan los estudios previos desarrollan bien la práctica. A continuación se comentan las diferentes prácticas realizadas.

En primer lugar se trabaja con los transistores BJT presentando tres regiones de operación: zona activa directa, zona activa inversa, saturación y corte. Trabajando los circuitos con la excitación adecuada, pueden amplificar la señal (pequeña señal) o conmutar (gran señal). En la práctica la mayoría de los alumnos llegan a la función característica entrada salida del transistor en emisor común trabajando como conmutador.

Se continua con los transistores MOSFET, cuyas formas de operación son: óhmica, saturación y corte. Cuando operan como circuito dependiendo de la excitación pueden trabajar como amplificadores (pequeña señal) o como conmutadores (gran señal). En la práctica del inversor NMOS de enriquecimiento los estudiantes tienen problemas con el estudio previo en la determinación del punto de paso de saturación a óhmica, solucionado esta cuestión en la práctica llegan a la característica entrada–salida.

Ahora se avanza a las familias lógicas, las cuales están constituidas por transistores que conmutan de corte a saturación o zona activa directa, siendo estas últimas las más rápidas, realizando una determinada operación lógica definidas por la tabla de verdad. Se verán tres familias las TTL, la ECL y las MOS. Estas tienen unas buenas características si su retardo es pequeño, el consumo es bajo y el área en que está integrado el transistor es reducida. Así, en la practica de diseño NAND y NOR es donde suelen encontrar problemas los alumnos principalmente en el conexionado de los NMOS con los PMOS.

Finalmente, en cuanto a las memorias de lectura y escritura electrónicas (RAM) se deben analizar los circuitos de lectura/ escritura. Después, mediante el direccionamiento se extraen los datos y finalmente se trabaja en otra característica que es su capacidad usualmente en GBytes.

IV. Discusión

Según se ha comentado en parte la educación racional también tiene aspectos motivadores como son :

1. El plantear dudas para que lleguen por reflexión a las verdades (método socrático) lo que ayuda en el aprendizaje.
2. Con los problemas que deben intentar hacer, a ser posible deben resolverse por el alumno. Esto motiva porque ve que va avanzando en la aclaración de los conceptos y los alumnos son ayudados por el profesor intentando en la clase resolver todas las dudas.
3. En las prácticas se verifican los modelos teóricos, si se resuelven previamente los estudios previos, el profesor

los verificará. En el laboratorio los alumnos comprueban el comportamiento de los circuitos y posteriormente se entregan las prácticas corregidas para poder aprender de los errores.

4. En las valoraciones parciales si se obtiene una buena puntuación quiere decir que se progresa bien en la asignatura lo que hace que les motive. Si se obtiene una nota baja pero se les dice donde están los errores, pueden mejorar y motivarse para hacerlo mejor en el futuro.
5. La evaluación es fundamental para motivar en el proceso de aprendizaje, ya que se comprueba que se resuelve de forma adecuada los problemas. Con una valoración adecuada se puntúan las prácticas valorando los estudios previos, la realización de la práctica y las medidas. Esto ayuda al alumno a una comprensión más completa de la asignatura.

Desde el punto de vista de la educación emocional podemos destacar los siguientes aspectos:

1. Mantenemos el interés al hacer la encuesta sobre conocimientos previos y la disposición del alumno respecto a la asignatura.
2. Activamos la curiosidad al presentar la asignatura por sus bloques temáticos, haciendo hincapié en las aplicaciones.
3. Avanzamos en el conocimiento al buscar las esencias (conceptualización) y las relaciones (estructura).
4. Mediante los mapas conceptuales jerarquizamos los conceptos, vemos las relaciones, así como las aplicaciones.
5. Plantear problemas integradores relevantes permite dividir el sistema en subsistemas donde las soluciones son más sencillas, y si además se hace en grupo (colaborativamente) podrán llegar los alumnos a una solución satisfactoria.
6. El hacer un resumen global a final de curso sobre todos los bloques temáticos explicados en la asignatura proporcionará profundidad en el aprendizaje de los conceptos, leyes, teorías, modelos y circuitos de aplicación, y por tanto obtendremos mejores resultados en la evaluación de nuestros estudiantes.

Finalmente, al comentar los errores más comunes cometidos en cada una de las prácticas, servirá para aprender de los errores, además servirá de complemento a la teoría, lo que redundará en una mejora de la evaluación.

REFERENCIAS

[1] DELORS J. Informe de la Comisión Internacional sobre la Educación en el s. XXI: La educación es un tesoro. Santillana Ediciones UNESCO, 1996.

[2] FACIO A. La celestina. Publicada por el circulo de Bellas Artes de Madrid, 1984.

[3] FORTET P., SIVIANES F., BELLIDO J.M. Aspectos de mejora de los procesos formativos en Arquitectura y Tecnología de Redes, y Laboratorio de Desarrollo Hardware. TAEE 2014.

[4] FREIRE P. La educación como práctica de la libertad . S XXI de España Editores, 1969.

[5] GARCIA F.J., DOMENECH F. Motivación,aprendizaje y rendimiento escolar. Revista eléctronica de Motivación y Emoción. Vol 1, nº 0,1997.

[6] GARCIA J.A. La educación emocional en el proceso de Aprendizaje. Revista de Educación Vol 36, nº 1, 2012.

[7] TAPIA J.A. Motivar para el Aprendizaje. Editorial Edebé, 1997.

[8] TAPIA J.A. Motivación para el Aprendizaje. Perspectiva del alumno. Publicado por el Ministerio de Educación y Ciencia,2006.

[9] PEKRUN R. The impact of emotions on Learning and Achievment: Towards a Theory of Cognitive/ Motivational Mediators. Applied Psycology: An International Review, Vol 41,4, p 359-376, 1992.

[10] SERRA A. Máster de Educación Emocional e Inteligencias multiples. Universidad Pablo de Olavide, 2017.

Planificación Docente de una Asignatura de Dispositivos Electrónicos Avanzados Orientada a los Objetivos de Aprendizaje EUR-ACE

D. G. Reina
Dpto. Ingeniería
Universidad Loyola Andalucía
Sevilla, España
dgutierrez@uloyola.es

M. Perales, S. L. Toral
Dpto. Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
{mperales, storal}@us.es

***Abstract*—El sello EUR-ACE® es un certificado que una agencia autorizada (en España ANECA) otorga a un título de grado o máster en ingeniería que cumple unos determinados estándares de calidad. Se trata de una marca de calidad internacionalmente reconocida que facilita la movilidad y el reconocimiento de los titulados. Este artículo trata sobre el diseño y planificación que se les ha dado a dos asignaturas de máster oficiales que versan sobre dispositivos electrónicos digitales avanzados con énfasis en aplicaciones para el Internet de las cosas o "Internet of Things" (IoT). Diferentes actividades teórico-prácticas se han planificado y evaluado según los seis objetivos de aprendizaje definidos en el sello. Los resultados muestran el nivel de consecución de dichos objetivos desde el punto de vista de los estudiantes y del profesorado. Los resultados obtenidos permites cuantificar numéricamente qué actividades contribuyen a alcanzar los objetivos planteados en el sello EUR-ACE.**

Keywords— EUR-ACE, Resultados de Aprendizaje, Dispositivos Electrónicos. Internet of Things

I. INTRODUCCIÓN

El sello EUR-ACE en el ámbito de la ingeniería se creó en el año 2000 con el apoyo inicial de la Comisión Europea y, desde 2006, se gestiona desde la European Network for the Accreditation of Engineering Education (ENAEE) de forma descentralizada a través de las agencias nacionales de cada país (ANECA en el caso de España) [1]. Los resultados de aprendizaje establecidos por ENAEE para la obtención del sello EUR-ACE son 6: cocimiento y comprensión, análisis en ingeniería, proyectos de ingeniería, investigación e innovación, aplicación práctica de la ingeniería y competencias transversales. El sello EUR-ACE garantiza la calidad de la enseñanza a nivel superior, por lo tanto, dicho sello deber ser tenido muy en cuenta a la hora de diseñar y planificar nuevas asignaturas tanto de grado como de máster [2].

Este artículo presenta el diseño y planificación de una asignatura (son dos asignaturas que tienen el mismo temario para dos másteres distintos) orientada al estudio de sistemas electrónicos digitales avanzados con especial énfasis en aplicaciones para el Internet de las Cosas o "Internet of Things" (de ahora en adelante IoT) [3]. Este trabajo se enmarca dentro de las asignaturas "Diseño Electrónico e Instrumentación Industrial 2"(DEII2) del Máster universitario oficial en Ingeniería Industrial y "Sistemas Digitales Avanzados y Aplicaciones" (SDAA) del Máster universitario oficial en Electrónica, Robótica y Automática, impartidos en la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla. Se ha elegido el énfasis en IoT debido al gran auge que está tomando dicho paradigma de comunicaciones, el cual permite que dispositivos electrónicos puedan intercambiar información de forma distribuida. Se prevé que para el año 2020 más de 25 billones de dispositivos electrónicos estén conectados a Internet. Por lo tanto, es importante que los alumnos estén familiarizados con el manejo de dispositivos electrónicos para IoT. Las actividades planificadas permiten cubrir aspectos relevantes tales como programación de microcontroladores (entrada/salida), comunicaciones, manejo de APIs ("Application Programming Interfaces") para IoT, lectura de sensores, manejo de cámara de video, etc.

Este artículo presenta el diseño de las distintas actividades que se han desarrollado para cumplir con los resultados de aprendizaje definidos por el sello EUR-ACE. Es importante indicar que los objetivos de aprendizaje deben ser cubiertos por todo grado o máster. No obstante, se ha intentado cubrir el mayor número posible de objetivos. Además, y como contribución relevante, se ha evaluado la consecución de dichos objetivos. La evaluación se ha llevado a cabo tanto por los alumnos de las dos asignaturas como por el profesorado. Dicha doble evaluación es interesante ya que permite comprobar la distintas visiones en el grado de consecución de los objetivos que tienen los alumnos y los profesores.

El resto del artículo se encuentra estructurado de la siguiente forma: la sección siguiente detalla las metodologías docentes más relacionadas con el resultado de proyectos de ingeniería. La sección III detalla varios casos de estudio concretos donde se describen los proyectos llevados a cabo. La sección IV muestras los resultados obtenidos en diversas asignaturas y las principales dificultades encontradas. Finalmente, la sección V concluye el artículo

II. RESULTADOS DE APRENDIZAJE EUR-ACE

El objetivo principal de EUR-ACE es establecer un sistema europeo de acreditación que garantice la calidad de la enseñanza superior y que le permita establecerse como un estándar de calidad reconocido globalmente. Los resultados de aprendizaje

para estudios de grado y de máster están divididos en las siguientes seis áreas

- **Conocimiento y comprensión:** Los titulados deben demostrar conocimiento y comprensión tanto de los fundamentos básicos generales de la ingeniería como de los de su rama o especialidad.
- **Análisis en ingeniería:** Los titulados deben ser capaces de resolver problemas de ingeniería de acuerdo con su nivel de conocimiento y comprensión, lo que implica a menudo tener en cuenta algunos aspectos que quedan fuera de su ámbito de especialización. El proceso de análisis incluye la identificación del problema, el reconocimiento y la clarificación de las especificaciones, el establecimiento de diferentes métodos de resolución, la selección del más adecuado y su correcta aplicación. Los titulados deben ser capaces de utilizar diversos métodos, tales como el análisis matemático, la modelización computacional y la experimentación.
- **Proyectos en ingeniería:** Los egresados deben ser capaces de realizar proyectos de ingeniería de acuerdo con su nivel de conocimiento y comprensión, trabajando en cooperación con otros ingenieros y titulados. Los proyectos pueden ser de dispositivos, procesos, métodos o artefactos, y las especificaciones podrían ser más amplias que las estrictamente técnicas.
- **Innovación e investigación:** Los egresados deben ser capaces de usar métodos apropiados para llevar a cabo investigación y estudios detallados de aspectos técnicos en consonancia con su nivel de conocimiento y comprensión. La investigación implica búsquedas bibliográficas, planteamiento y ejecución de experimentos, interpretación de datos y simulación por ordenador.
- **Aplicación práctica de la ingeniería:** Los titulados deben ser capaces de aplicar su conocimiento y comprensión para desarrollar la capacidad de resolver problemas, llevar a cabo investigaciones, diseñar dispositivos y definir procesos de ingeniería. Estas competencias incluyen el conocimiento, uso y limitaciones de materiales, modelos informáticos, ingeniería de procesos, equipos, trabajo de talleres, bibliografía técnica y otras fuentes de información.
- **Competencias transversales:** Las competencias necesarias para la aplicación práctica de la ingeniería, y que son aplicables de manera más amplia, deben desarrollarse dentro del programa formativo.

Cada una de las seis áreas es más detallada dependiendo si se trata de asignaturas de grado o de máster, siendo los criterios para las materias de máster más exigentes. Debido a que las asignaturas que se diseñan y evalúan en este trabajo corresponden a asignaturas de máster, la Tabla 1 detalla cada uno de los criterios que se definen para terminar si se cumple cada uno de los objetivos de aprendizaje.

III. Diseño y Planificación propuestos

Ambas asignaturas (DEII2 y SDAA) versan sobre el estudio de sistemas digitales basados en microprocesador y sistemas embebidos o "Systems on Chip" (SoC) con especial énfasis en aplicaciones y arquitecturas para IoT. Las materias incluyen tanto sesiones prácticas como teóricas. Por lo tanto, uno de los aspectos más relevantes para el diseño y planificación de ambas asignaturas es la selección del dispositivo electrónico digital (dispositivo IoT) apropiado para desarrollar las sesiones prácticas. A continuación, se describe las principales características que se han tenido en cuenta para realizar dicha elección, el diseño y organización de las actividades que se realizan, y cómo las actividades desarrolladas permiten alcanzar los objetivos de aprendizaje reflejados en el sello EUR-ACE.

A. Dispositivos digitales electrónicos para aplicaciones IoT

En la actualidad existen multitud de dispositivos electrónicos en el mercado que pueden ser adecuados para desarrollar aplicaciones IoT [3]. Para realizar una selección adecuada, es importante considerar las principales características de dichos dispositivos, sobre todo a la hora de facilitar el aprendizaje. No es sólo importante que el dispositivo sea adecuado, sino que también deben considerarse que disponga de los recursos y plataformas necesarias para que los alumnos puedan desarrollar las aplicaciones sin una curva de aprendizaje muy elevada.

Las principales características que los dispositivos deben disponer son:

- Interfaces para el acceso a Internet: El dispositivo (tarjeta electrónica), debe disponer de las interfaces que comúnmente se utilizan para conectarse a los puntos de acceso de Internet, tales como conexión Ethernet y WiFi.
- Interfaces con el mundo real: El dispositivo debe ser capaz de interactuar con el mundo real a través de sensores y actuadores que puedan ser fácilmente conectables.
- Interface de programación: La programación del dispositivo debe ser relativamente sencilla, ya que las materias se imparten en másteres en los que los alumnos no tienen una formación elevada en lenguajes de programación.
- Bajo consumo: Aunque no es una característica primordial en todas las aplicaciones, si es una propiedad a tener en cuenta en aplicaciones IoT.
- Precio: Debe tener un precio adecuado para poder realizar aplicaciones ubicuas para IoT.

A continuación, se describen algunos dispositivos que cumplen los mencionados requisitos:

- Arduino Mega con la tarjeta de expansión XBEE: Esta tarjeta incluye entradas y salidas digitales y analógicas. Además, se puede conectar de forma inalámbricas con otros dispositivos a través de Zigbee. Sin embargo, la conexión a Internet debe realizarse a través de otras tarjetas de expansión. Con respecto a la arquitectura, se trata de un micro de 8 bits de Atmel. La programación es sencilla.
- Fdrm-K64F de Freescale (NXP): Se trata de una tarjeta basada en un microprocesador ARM Cortex M4F. La tarjeta incluye un puerto Ethernet, así como otras interfaces típicas como I2C, UART, etc. Dispone de un

entorno de programación sencillo denominado M-Bed Platform.

- CC3100 Boosterpack con MSP432P401R: Conjunto de tarjetas diseñadas para aplicaciones IoT. Está también basada en un microprocesador Cortex M4F. La conexión a Internet se realiza a través de módulo integrado WiFi CC3100. Es un dispositivo para aplicaciones de bajo consumo. La programación se realiza en C.

Tabla 1. Criterios para la consecución de los objetivos de aprendizaje

	Conocimiento y Comprensión (CC)		**Innovación e Investigación (II)**
CC1	Un profundo conocimiento y comprensión de los principios de su especialidad.	II1	Capacidad de identificar, encontrar y obtener datos.
CC2	Conciencia crítica de los conocimientos de vanguardia de su especialidad.	II2	Capacidad para diseñar y llevar a cabo investigaciones basadas en el análisis, la modelización y la experimentación.
CC3	Conciencia crítica en un contexto de ingeniería multi-disciplinar.	II3	Capacidad de analizar de forma crítica los datos y llegar a conclusiones.
		II4	Capacidad de investigar la aplicación de nuevas tecnologías de su rama de ingeniería.
	Análisis en Ingeniería (AI)		**Aplicación Práctica de la Ingeniería (AP)**
AI1	Capacidad para resolver problemas fuera de las pautas estándar de su rama de ingeniería, definidos de forma incompleta o que tienen diferentes soluciones válidas.	AP1	Capacidad de integrar conocimiento de diferentes campos y manejar su complejidad.
AI2	Capacidad de formular y resolver problemas en nuevas áreas emergentes de su especialidad.	AP2	Conocimiento integral de métodos y técnicas aplicables y de sus limitaciones.
AI3	Capacidad de utilizar su conocimiento y la comprensión suficiente para concebir modelos, sistemas y procesos de ingeniería.	AP3	Conocimiento de las implicaciones no técnicas de la aplicación práctica de la ingeniería.
AI4	Competencia para aplicar métodos innovadores en la resolución de problemas.		
	Proyectos en Ingeniería (PI)		**Competencias Transversales (CT)**
PI1	Capacidad de utilizar su conocimiento y comprensión para aportar soluciones a problemas que requieran conocimientos más allá de los propios de su disciplina	CT1	Funcionar de forma efectiva como líder de un equipo formado por personas de distintas disciplinas y niveles.
PI2	Capacidad creativa para desarrollar ideas y métodos nuevos y originales.	CT2	Trabajar y comunicarse eficazmente en contextos nacionales e internacionales.
PI3	Capacidad de utilizar su sentido técnico para trabajar con información incompleta, compleja e incertidumbre técnica.		

- Feather HUZZAH ESP8266: Micro dispositivo orientado a aplicaciones IoT. Contiene multitud de puertos de entrada y salida digitales. Contiene puertos analógicos para realizar tareas de sensado. Contiene un módulo Wi-Fi integrado y se puede programar en micro Python.
- Onion Omega2+: Tarjeta basada en procesador MT7688. Dispone de una distribución de Linux y un módulo WiFi integrado. No permite conexión Ethernet. En cuanto a la programación, se puede programar en cualquier lenguaje de programación compatible con la distribución de Linux que contiene.
- Raspberry Pi3: Tarjeta basada en el procesador de 64 bits BCM2837. Tiene un puerto Ethernet y puertos USB. Por defecto viene con un sistema operativo basado en Debian, pero se pueden usar distintos sistemas operativos basados en Linux. Aunque el micro no contiene entradas analógicas, existen numerosas placas de extensión que permiten conectar el dispositivo con una gran grama de sensores. El lenguaje de programación oficial es Python, pero se puede programar con cualquier lenguaje de programación compatible con la distribución de Linux que se le instale. Dispone de módulos incorporados tanto de WiFi como de Bluetooth.

La Tabla 2 resumen las principales características de los dispositivos electrónicos considerados.

Tabla 2. Comparativa de dispositivos

Nombre	**Plataforma**	**Ethernet / WiFi**	**ADC**	**Pines E/S**	**Precio**
Arduino Mega+Shield	Arduino	No/No	16	68	68 €
Freedom K64F	m-bed	Yes/no	9	64	35$
CC3100+MSP432	Energia	No/Yes	24	70	31$
Feather Huzzah 8266	MicroPython	No/Yes	1	18	16,95 $
Omega2+	Linux	Yes/Yes	No	15	9$
Raspberry Pi 3	Linux	Yes/Yes	No	40	33€

La elección final ha sido elegir el dispositivo Raspberry Pi 3 como el más adecuado para realizar las actividades prácticas de las asignaturas. Aunque el dispositivo no es el más óptimo para algunas de las características evaluadas, por ejemplo, en cuanto a consumo o precio, es el dispositivo que dispone de una mayor comunidad de usuarios, por lo que dispone de una documentación muy amplia y de una gran comunidad de

programadores. Un aspecto importante ha sido que dispone de distintas distribuciones de Linux, siendo esta característica importante para facilitar su uso. Los alumnos que cursan ambas asignaturas no disponen de la formación adecuada para trabajar con dispositivos electrónicos a bajo nivel. En cuanto a Arduino, se ha considerado que es una plataforma para niveles de enseñanza más bajos.

B. Organización de las asignaturas

Las sesiones teóricas están divididas en tres temas. En primer lugar, se realiza una introducción a los dispositivos electrónicos para aplicaciones IoT. Se introduce a los alumnos a los dispositivos embebidos y los sistemas operativos Linux. El primer tema acaba resumiendo las tendencias actuales en cuanto a aplicaciones IoT. El segundo tema trata sobre arquitectura de procesadores, introduciendo algunos conceptos sobre el conjunto de instrucciones de un procesador y la paralelización de las mismas. En primer lugar, se explican las arquitecturas basadas en "pipeline", para pasar a arquitecturas más complejas para procesadores súper escalares y VLIW ("Very Long Instruction Word"). Para acabar el tema 2, se ponen ejemplos de dispositivos comerciales para IoT que están basados en dichas arquitecturas. El tercer tema trata sobre conceptos relacionados con la memoria de los dispositivos. Se hace hincapié en la jerarquía de memoria y la importancia de las memorias caché. Al igual que en el tema 2, se ponen ejemplo de dispositivos comerciales y de su jerarquía de memoria.

Las clases teóricas se complementan con clases de laboratorio con los dispositivos Raspberry Pi 3. Durante la primera sesión, se introduce a los alumnos al dispositivo y al sistema operativo Raspbian. Se les muestra cómo pueden manejar el dispositivo conectándolo a sus ordenadores portátiles. Durante la primera sesión práctica, se realiza una introducción práctica al lenguaje de programación Python, mediante un aprendizaje basado en "Learning by doing" [4]. Es decir, los alumnos hacen pequeños ejercicios para aprender los conceptos de programación. Para finalizar la primera sesión práctica, se corren distintos scripts en Python para manejar las entradas y salidas digitales. La segunda sesión práctica está orientada a introducir aplicaciones IoT que se pueden desarrollar con el dispositivo Raspberry Pi 3 en Python. Los alumnos manejan los puertos de entrada y salida mediante un servidor Apache, y aprenden a enviar email y conectar a la red social Twitter en Python. La tercera sesión versa sobre el manejo de la placa de extensión Sensehat. Esta tarjeta permite acoplar al dispositivo Raspberry Pi 3 diversos sensores, tales como sensor de temperatura, sensor de presión, acelerómetro, y una matriz de led 8x8 RGB. La captura de la información proveniente de los sensores se realiza utilizando librerías y APIs de Python. A su vez, la información se captura tanto de forma remota como en local. El modo remoto se utiliza para emular una aplicación IoT. La cuarta y última sesión se centra en el manejo de la cámara de video y foto (piCamera). Para manejar la cámara se utiliza la API OpenCV. Se realizan diversos ejercicios relacionados con la detección de objetos y reconocimiento facial.

Las sesiones prácticas se realizan durante la primera mitad del cuatrimestre, ya que durante la segunda mitad los alumnos deben desarrollar un proyecto (aprendizaje basado en proyectos) [5]. Ellos son responsables de elegir la temática del proyecto utilizando y extendiendo todo el material desarrollado durante las sesiones prácticas. El proyecto debe ser defendido ante un tribunal compuesto por los profesores de ambas asignaturas. Durante la presentación deben realizar una pequeña demostración del funcionamiento de la aplicación realizada en el proyecto.

La Tabla 3 resume las actividades de aprendizaje desarrolladas para ambas asignaturas.

Tabla 3. Resumen de las actividades de aprendizaje desarrolladas

	Actividades de Aprendizaje
AA1	Clases teóricas
AA2	Sesiones prácticas
AA3	Proyecto
AA4	Presentación
AA5	Demo

C. Grado de cumplimiento de los objetivos del sello EUR-ACE

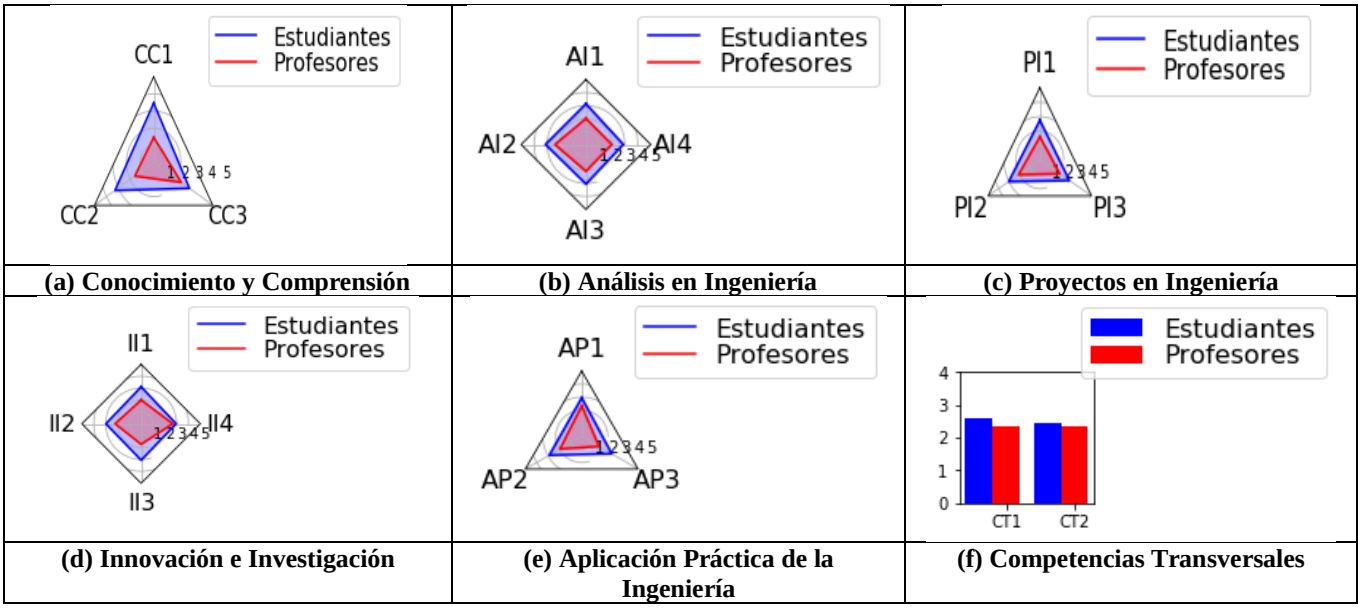
La organización y planificación de ambas asignaturas se realizó teniendo en cuenta los objetivos de aprendizaje descritos en la sección 2 (ver Tabla 1). El objetivo CC se cubre con las clases teóricas en las que los alumnos adquieren conocimientos de frontera y tendencias sobre arquitecturas y dispositivos electrónicos para aplicaciones IoT. El paradigma IoT, además de muy emergente, es multi disciplinar, ya que envuelve áreas como la electrónica, comunicaciones, redes y programación.

El objetivo PI es ampliamente cubierto por el proyecto que los alumnos deben realizar. Los estudiantes deben proponer un tema, que debe ser aprobado por los profesores, donde deben demostrar creatividad e innovación.

Los objetivos relacionados con la investigación y la innovación (II) se desarrollan durante las sesiones prácticas y el proyecto de ingeniería. Los proyectos deben ser una extensión del trabajo práctica y se valora muy positivamente que utilicen APIs que no hayan sido explicadas durante las sesiones prácticas. Es decir, la innovación del proyecto es una de las características principales que se valorarán.

La aplicación práctica de la ingeniería (AI) se desarrolla durante las sesiones prácticas y durante la demostración del proyecto de ingeniería realizado. Una vez terminadas las sesiones prácticas, los alumnos disponen de todo el material para que puedan practicar y desarrollar el trabajo en casa.

Finalmente, las competencias transversales se obtienen durante la presentación y demostración del proyecto. Los proyectos se realizan por parejas y ambos alumnos deben participar en la presentación del proyecto y en la demonstración del funcionamiento del mismo. A su vez, deben responder a preguntas relacionadas con el proyecto realizadas por el tribunal evaluador, compuesto por los profesores de las asignaturas.



(a) Conocimiento y Comprensión | **(b) Análisis en Ingeniería** | **(c) Proyectos en Ingeniería**

(d) Innovación e Investigación | **(e) Aplicación Práctica de la Ingeniería** | **(f) Competencias Transversales**

Figura 2. Contribución a cada uno de los objetivos de aprendizaje EUR-ACE, percepción de los estudiantes versus percepción de los profesores.

IV. Resultados

Esta sección muestra la evaluación de actividades de aprendizaje diseñadas y planificadas en ambas asignaturas y el grado de consecución de dichas actividades con respecto a los objetivos de aprendizaje EUR-ACE. La evaluación se llevó a cabo mediante cuestionario, tanto para los alumnos como para los profesores de ambas asignaturas. En el cuestionario se pregunta por cada uno de los objetivos de aprendizaje que aparecen en la Tabla 1. Los alumnos y profesores deben responder con una valoración de 0 (mínimo) a 5 (máximo) para cada uno de los objetivos de aprendizaje. La contribución global para cada uno de los seis objetivos de aprendizaje se ha representado mediante un diagrama de Kiviat, mostrado en la Figura 1.

En general, los estudiantes perciben un mayor grado de consecución de los objetivos de aprendizaje. Desde la perspectiva de los alumnos, la contribución menor corresponde a las competencias transversales, mientras que para el resto de los objetivos de aprendizaje responden de manera similar. Este resultado se puede explicar debido a que los alumnos normalmente se centran más en los aspectos técnicos, minusvalorando las competencias transversales, o incluso no siendo consciente de que dichas competencias están siendo desarrolladas. Sin embargo, los profesores sí indican la importancia de dichas competencias transversales.

La Figura 2, muestra la contribución para cada uno de los puntos de cada objetivo de aprendizaje (ver Tabla 1). En general, los estudiantes tienden a valorar de manera similar cada uno de los puntos comprendidos en los objetivos de aprendizaje. Por el contrario, los profesores sí identifican diferencias para los distintos puntos. Por ejemplo, en el caso de CC3, conciencia crítica en un contexto de ingeniería multi-disciplinar, y II4, capacidad de investigar la aplicación de nuevas tecnologías de su rama de ingeniería. Probablemente la diferencia en ambos casos corresponde a que los profesores que tienen una visión más amplia de la ingeniería y la tecnología. Por lo tanto, ellos pueden apreciar mejor cómo los contenidos de las asignaturas están relacionados con tecnologías emergentes.

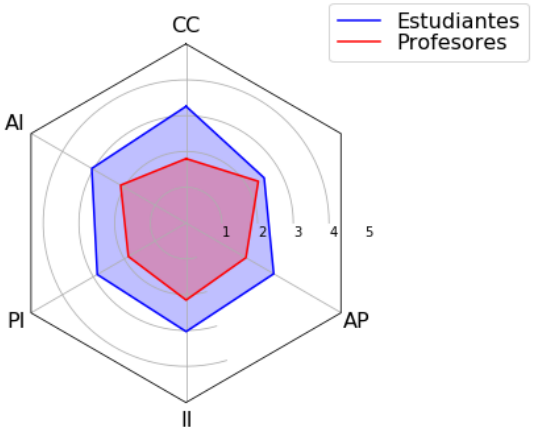


Figura 1. Contribución a cada uno de los objetivos de aprendizaje EUR-ACE, percepción de los estudiantes versus percepción de los profesores.

V. Conclusiones

Este artículo presenta el diseño y evaluación de una asignatura de máster (en realidad dos asignaturas que tienen el mismo temario), considerando diferentes actividades docentes para cumplir con los objetivos de aprendizaje establecidos en el sello EUR-ACE. Además, el artículo compara la contribución de cada uno de los objetivos desde el punto de vista de los estudiantes y desde el punto de vista de los profesores. Los resultados obtenidos son interesantes para el diseño de nuevas

asignaturas de máter que quieran satisfacer los objetivos de aprendizaje del sello, y a su vez, para hacer mejorar las asignaturas con la retroalimentación proporcionada por los alumnos.

REFERENCES

[1] ANECA e Instituto de la Ingeniería de España, Programa ACREDITA PLUS: Guía de evaluación para la renovación de la acreditación y la obtención del sello EUR-ACE® para títulos oficiales de Grado y de Máster en ingeniería, 2015.

[2] M. Duarte, A. Costa. "Meaning and benefits of the EUR-ACE label: Portuguese higher education institutions". International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL), 2015.

[3] H. Thapliyal. "Internet of Things-Based Consumer Electronics: Reviewing Existing Consumer Electronic Devices, Systems, and Platforms and Exploring New Research Paradigms". IEEE Consumer Electronics Magazine, Vol. 7, pp. 66-67. 2018.

[4] G. Frache, H. E. Nistazakis, G. S. Tombras. "Reengineering engineering education: Developing a constructively aligned learning-by-doing pedagogical model for 21st century education". IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), 2017.

[5] M. Perales, F. Barrero, S. L. Toral, "Resultados Docentes Usando una Metodología Basada en PBL en una Asignatura Troncal de Electrónica General", VAEP-RITA, Vol. 2, no. 4, pp. 179-186, 2015.

SESIÓN III.C: INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA 1

The VISIR Implementation Process at IFSC - problems, obstacles and solutions

Luis C. M. Schlichting, Daniel D. de Bona, Golberi S. Ferreira
Department of Electronics
Federal Institute of Santa Catarina (IFSC)
Florianopolis, SC, Brazil
{schlicht, golberi, dezan}@ifsc.edu.br

Gustavo R. Alves
Department of Electrical Engineering / CIETI
Polytechnic of Porto – School of Engineering (IPP-ISEP)
Porto, Portugal
gca@isep.ipp.pt

***Abstract*— In recent years, the use of remote laboratories applied to teaching has become more frequent in several educational institutions around the world. The benefits to the learning process are easy to verify. In addition, remote laboratories bring with their application, operational advantages associated to component inventory, equipment maintenance, security, plus other practical issues. Considering this general scenario, it is intuitive that the implementation of a remote laboratory and its use is easily recognized and accepted by the users, namely, students and teachers. This paper aims to present the obstacles and advantages observed in the implementation of the VISIR (Virtual Instruments Systems in Reality) remote lab at the Federal Institute of Santa Catarina - IFSC, as well as the obtained results.**

Keywords*— *remote labs, teaching-learning process, usability of remote laboratories, VISIR+ Project.

I. INTRODUCTION

This work describes the implementation and use of the VISIR remote lab, in the Technical Courses in Electronics and in the undergraduate courses in Electronic Engineering and Higher Course of Technology in Industrial Electronics of the DAELN - Academic Department of Electronics of the Campus Florianópolis, and also in the technical course in electronics of the Campus Itajaí, both from IFSC - Federal Institute of Santa Catarina. The implementation of VISIR was carried out by a team composed by lecturers and laboratory technicians, with this team being responsible for assisting and guiding students and teachers, setting up experiments and systems and mainly acting as a facilitating and motivating team.

This project has been funded by the European Commission. This publication reflects the views only of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.

To implement the VISIR remote lab, this team has worked from 2013 to 2017 and during this 4-year period it has faced several obstacles. To report this implementation process, this article will be divided as follows:

- Motivation and implementation feasibility;
- Technology definition;
- Initial steps;
- Usability of the VISIR platform at IFSC (VISIR@IFSC);
- The VISIR+ Project;
- Operation and implementation of the VISIR+ Project.

II. MOTIVATION AND IMPLEMENTATION FEASIBILITY

A. Motivation

The motivation to use a remote laboratory initiated when a group of teachers was seeking for a teaching strategy placing the students as active agents in their training, that is, the student as the center of the teaching-learning process. In that way, the initial steps were to build a teaching environment where the students could learn the theoretical concepts and apply them in computer simulations and practical implementation of experiments. The idea is to lead the students to acquire autonomy and decision-making ability on how they may build their knowledge, while the teacher must act as a facilitating agent in this process.

Thus, as shown in [1], if a schematic diagram of a transistorized amplifier is presented to a student and he/she is asked what must be the static voltage gain of the structure, what should he/she must do to get the value? Consider available resources like paper and pencil for notes, computers with appropriate simulation software, as well as components and electronic laboratory equipment. Which method would he/she choose to determine the value of the gain and what factors would he/she consider in his/her choice?

A practical experiment is regarded as a semantic approach where the student must deal with the "real world", its

appearance and manifestations without the intermediation of symbolic systems. Otherwise, using a computer simulation as a learning tool is to use the processing capacity of the computer to run a symbolic model of a circuit in an abstract space. It is an analytical exercise that occurs in a space of complete abstraction where only symbols exist and there is no similarity to the real-world appearance or behavior.

The students can choose what kind of approach they prefer to start learning something, considering how they feel more comfortable and confident and depending on their ability to process the information contained in different modalities, i.e., semantic or symbolic. In this case, the student must be introduced to the symbolic system and how to go from the real world to the space of abstraction and vice-versa.

As computers evolved, extra processing power could be used to create a semantically enriched mediation layer that is used as an interface for the student. Such enrichment consists in input modes that simulate the real appearance of electronic components and equipment and how to connect them to the circuit. While this approach gives some degree of realism and promotes safety (because it is a simulation), it implies some limitations in reproducing the real-world behavior such as the lack of variation on the component specifications, interference of the environment and self-interference effects [1], [2].

On the other hand, the practical experiments are also limited, because the student can only make the experiments at IFSC facilities and during the class period.

Thus, although students could decide between computer simulations and practical experiments, the process of having the student as the central agent of the learning process has always problems related to real-world emulation and space/time limitations.

Computer mediated emulation, or remote experimentation, solves these problems by using physical arrangement consisting of real components and equipment, instead of analytical models. In this case, the role of the computer is initially to control a relay matrix that interconnects electronic components and equipment in a defined topology, and then offer an interface layer where the student can edit the circuit connections and obtain the results of the experiment. If the computer that controls the remote experiment is connected to the internet, the students can conduct their own experiments remotely from their personal computer at any time and from anywhere [3], [4].

B. Implementation Feasability

In Brazil, the Law of Basic Education Directives (LDB) - Law 9394 from December 20th 1995 establishes in its article 80 that Higher Education Institutions (HEI) can offer courses 100% in the distance education modality (EaD). This article is regulated by Decree 5.622, from December 19th 2005. Parallel to the regulation of the 100% EaD courses and seeking to further encourage the EaD modality and associated technologies, the Administrative Rule No. 4.059, from December 10th 2004, was published, which allows HEI to use EaD and its technologies in 20% of the total hours of a course.

In this context, considering the established Brazilian Law, it is possible to implement a strategy to execute practical experiments by using remote experimentation.

However, the feasibility of implementing remote experimentation also encounters two obstacles. The first refers to the technology to be used for remote experimentation and its costs, and the second refers to the cost/benefit ratio, understood here as the benefit related to the number of students and disciplines attended by remote experimentation.

III. DEFINITION OF THE TEACHING TECNOLOGY – REMOTE LABORATORIES

It is known that the ideal situation should be to apply a technology that combines the advantage of the use of computers and the internet, as in the case of computer simulations, with the practice of the physical laboratories, where the students can assemble a circuit, make connections and measure values resulting from the “real word”. This kind of experimentation, in fact, already exists and it has been developed in different places of the world as remote laboratories. It consists in a physical unit composed of a server computer that communicates with the client through a web interface and with the experiment board, where all components and measuring instruments are installed. Thus, the laboratory can be assembled in a specific location and users from all over the world can access it and conduct real experiments through the internet [1]-[8].

Remote laboratories do not present physical risks to the student's health and equipment, and in addition, they provide the same experience of a real laboratory, because the circuits are assembled with real components and the results are made with real measurement equipment. The remote lab interface with the users is exactly the same as the front panel of all the used equipment, such as an oscilloscope, a signal generator, power sources, and a multimeter, among others. This whole experience is part of the student's imaginary about what is a laboratory and promotes an important emotional incentive in the learning process [1]-[5].

Another interesting feature is the fact that experiments can be carried out outside normal school hours, when staff usually needs to supervise the experiments in real laboratories. This promotes greater flexibility for teachers who can use class time for giving more explanations and theoretical orientations rather than spending part of the time with the organization of the laboratories, and also for students, who can practice at more adequate times and with more concentration. In addition, some remote laboratories provide virtual discussion rooms about practice results as well as tutoring where teachers can schedule a specific time to answer questions from their students who can be anywhere, such as in their respective homes, for instance [1]-[11].

The VISIR remote laboratory was chosen to initiate a new phase of the learning process at IFSC based on its characteristics and also because it was already in use at the Polytechnic of Porto (IPP), an important partner of IFSC since 2009. Thus, through IPP, IFSC was able to test and evaluate VISIR in its academic context [1], [9].

IV. First Steps

After selecting the VISIR remote laboratory as the teaching technology, in the second semester of 2013 a professor proposed two experiments to fifteen students in the subject of Operational Amplifiers. A tutorial was given to the students explaining how to access the VISIR platform and the schematic of the proposed circuit. Students were then asked to perform the experiment as a regular classroom activity. At this occasion, the students were not informed that the main objectives were to verify the applicability of a remote laboratory in the teaching of such subject and also if they would adapt in a natural way to the use of this new technology-enhanced education tool. This omission was intentional to not induce the students to think about such matters when performing the experiment. The idea was that the experiment should be done in a natural way [1].

In general, the activity was well accepted by the students, and they pointed several positive and negative opinions about the tool. There was a difference of opinions when they were asked if it felt like performing a practical experiment or a simulation. Some said that it was like a real experiment because of how components are positioned, instruments calibrated, and so on. Another group of students answered that it was like a simulation, because everything was performed in a computer environment. However, everyone converged to a common opinion: this method does not replace practice, but it is an excellent learning tool for electronics subjects [1].

V. Usability of the VISIR platform at IFSC

As presented, the obstacles to the use of remote laboratories are the cost of the VISIR platform and the number of students and subjects that can be served.

A. Number of subjects/students

Considering the students' acceptance of the experimental activities in the remote laboratory, the next step was to expand their use to other subjects taught at the Academic Department of Electronics (DAELN). To do this, it was necessary to verify with the teachers the possibility to implement VISIR in their subjects and how it could be used. Thus, a questionnaire was applied with two questions asking teachers about who would teach subjects in second semester of 2014 in the following courses [7]:

- Technical Course in Electronics;
- Superior Course of Technology in Industrial Electronics;
- Electronic Engineering Course;
- Post-Graduate Course in Electronic Product Development.

The questions were as follows:

1. How many experiments did you perform in the subject?

2. Other experiments can be implemented in the remote laboratory?

Three workshops were held in order to help the teachers to answer the questions. These workshops took place in the first semester of 2014 and they aimed at presenting the principles and to capacitate the teachers on the use of the VISIR platform. The presentation was done to 29 teachers. However, only 9 teachers were willing to cooperate with the project and they were trained on how to use VISIR. It is important to emphasize that the other teachers did not participate for different reasons, for instance:

- They taught a discipline in which they did not see how to apply VISIR;
- They did not intend to use a technology that would change their teaching-learning process;
- They understood that the simulation already fulfilled what VISIR was proposing.

The majority of the teachers actually taught subjects in which it is difficult to verify how to apply VISIR (e.g. microcomputers, antennas, digital electronics, etc.). However, some teachers showed resistance to use a technology that they did not have knowledge about, and which (mainly) requires a paradigm shift.

Considering the results presented in [9], it was possible to verify the approval and interest of the teachers related to the use of VISIR, as the teachers answered that they could do a significant number of their experiments using the remote laboratory. In some disciplines, it would be possible to increase the number of experiments usually performed. This is due to the necessary preparation of the real laboratory experiments, which demands time during the class. Considering the results of [9], there are 58 accomplished experiments and 70 applicable experiments.

With the perception of the approval by students and professors and with the possibility of the VISIR platform to attend nine professors from eleven disciplines for approximately one hundred students per semester, the application of VISIR in the second semester of 2014 was started.

To initiate this process, two hypotheses were raised: the first would be the purchase of a VISIR system by IFSC and the second would be continuing to use the VISIR@IPP platform, as in the second semester of 2013.

B. Cost of the VISIR platform

The VISIR remote lab is a system composed by hardware and software elements. The hardware is composed by a NI PXI instrumentation platform from National Instruments, which has a specific chassis for each PXI model and instrument modules such as power supply, digital multimeter, function generator and oscilloscope. These instrument modules are connected to the chassis and to a controller module. The controller module is a server computer that can be mounted onboard (docked into the chassis) or it can be an external computer. Using coaxial cables, the PXI is connected to a relay matrix, which also contains individual printed circuit boards that connect each module of the NI PXI [5], [8].

As a public and federal education institution, IFSC must attend specific legislation for equipment acquisitions. The purchases made by IFSC must be done through Public Bidding where the proposal that matches the technical requirements at the lowest price is usually the chosen one. This Call is usually a quite slow and time-consuming process. Considering this, in the first semester of 2014 an NI PXI system was included in a Public Bid [7]. The first trading session with this item occurred at the end of 2014 and, for the PXI module, the value presented by the winning bid was approximately € 36,000.00. The complete VISIR system would cost approximately € 47,000. This amount corresponds to approximately 60% of DAELN's annual equipment purchase budget. Thus, the purchase of the VISIR system by IFSC was not possible. One option would be to purchase VISIR in parts in more than a year. It was found that with this procedure it would take around 3 years to acquire the complete system.

C. *Using the VISIR@IPP platform*

Once the first hypothesis for using VISIR was set aside, the second one was to use the VISIR platform installed at IPP (i.e. the VISIR@IPP platform). For this purpose, a preparation meeting was held with the interested teachers in order to establish the methodology of the implementation of the experiments on several subjects in the first semester of 2014. The new IFSC-VISIR team encountered the following situations:

- IPP already had the matrixes almost fully occupied with components;
- The available components and connection possibilities did not meet the DAELN teachers' necessities;
- Some DAELN teachers did not want to change their circuits, that is, to adapt to existing connections and components. This is because this adaptation would again result in a major change in their experimental programming and consequently in their teaching strategy.

These remarks showed that the second hypothesis was also practically unfeasible.

It was noticed the difficulties to implement VISIR system, due to the cost, the purchase process and the hard work to convince teachers to change paradigms.

VI. THE VISIR+ PROJECT

At the end of 2014, the IFSC-VISIR team was asked to participate in a project involving twelve institutions from six countries. This project aimed to transfer educational technology from Europe to other countries, using funds from the European Community's Erasmus+ Program [10].

In 2015 the Erasmus+ Program approved the project entitled "Educational Modules for Electric and Electronic Circuits Theory and Practice following an Inquiry-based Teaching and Learning Methodology supported by VISIR".

The main objectives of the project are:

• Development and application of educational modules;

• Acquisition and installation of a VISIR platform in the Latin American partners;

• Dissemination of the obtained results;

• Dissemination of the VISIR platform to associated partner institutions.

On the proposal, the project started in October 2015 and finished in October 2017. The second major objective of the project (acquisition of a VISIR platform) was finally met.

VII. OPERATION AND IMPLEMENTATION OF THE VISIR+ PROJECT

The operational phase and the consequent implementation of the VISIR+ project began in October 2015. This phase can be summarized in the following steps:

- Project agreement signature;
- Transfer of resources from the European Community's Erasmus+ Program to IFSC;
- Acquisition of the VISIR platform;
- Implementation of the didactical modules at IFSC;
- Dissemination of the project to the associated partner institutions.

A. *Project agreement signature*

Initially, it was thought that this would be an easy step, however, the IFSC's administrative staff encountered many bureaucratic and management problems. It happens because this was the first time that a project brought international monetary resources to IFSC. Due to that, the administrative staff faced a procedure they had never performed before. The understanding of how the agreement should be implemented showed to be a barrier to the signature of the agreement. There was a risk of signing the agreement and not being able to use the resources from the Erasmus+ Program. This procedure took extra time from the project and could only be finished at the end of 2016, when the agreement was finally signed.

B. *Transfer of resources from European Community's Erasmus+ Program to IFSC*

This stage was less bureaucratic, but barriers were also found. The main problem encountered was that any resource received by IFSC should be foreseen in the annual budget of the previous financial year with its origin duly justified. As the resources of the VISIR+ Project had not been initially foreseen, it was necessary to make a change in the IFSC's budget. Budget revisions or changes are possible but can only be made in certain periods of the year, called budget review window. This budget review must be approved by the Brazilian Ministry of Planning, Development and Management. Thus, only after the change in the annual IFSC's budget it was possible to transfer monetary resources from the Erasmus+ Program to IFSC. The transfer was done at the end of 2016.

C. *Acquisition of the VISIR platform*

In parallel with the transfer of the monetary resources, administrative staff, together with the IFSC-VISIR team, began the acquisition process of the VISIR platform. However, as the purchase of the equipment by IFSC can only be made through a Public Bidding process, it would take approximately 12 months. This amount of time would only allow the acquisition of VISIR platform in August 2017. As the project was due to expire in October 2017, the process would make the VISIR+ Project probably unfeasible.

In addition to the slowness of the purchase process, the IFSC-VISIR team found one more problem for the acquisition of the equipment. The first quotes of these equipments presented values above the predicted in the project proposal.

To solve these problems, the solution found was to sign an extra agreement with the Engineering Teaching Foundation of Santa Catarina - FEESC. The agreement with FEESC was extremely useful in the acquisition of the VISIR system. In May 2017 the system was installed at IFSC, at a cost of 50% of the Public Bidding quotation.

D. *Implementation of the didactical modules at IFSC*

Although the VISIR system was only installed at IFSC in May 2017, the IFSC-VISIR team was able to implement the first didactic modules. Despite the teachers' resistance in using the VISIR@ IPP platform, in 2016 the VISIR system was used by one teacher in the subject of electrical circuits. In the two semesters, 40 students accessed the system more than two hundred times.

From May 2017 onward, the IFSC-VISIR team initiated a new approach to DAELN teachers in an attempt to convince them to use the VISIR platform, since the IFSC now had a system and could be configured according to their needs. The teacher who had used the IPP VISIR platform in 2016, again, in the first semester of 2017 used the IPP VISIR platform. In the second semester of 2017, he was able to use the VISIR@IFSC platform, this time with 25 students.

In the second semester of 2017, the VISIR@IFSC platform was used by six professors in six subjects at the IFSC - Campus Florianópolis and by one professor in one subject at the IFSC - Campus Itajaí. This semester, it was used by 150 students with more than 1000 accesses. The courses in which the VISIR@IFSC platform was used were:

- Operational amplifiers;
- Circuits III;
- Electricity I;
- Electricity II;
- Electronics II;
- Amplification Structures;
- Instrumentation (Campus Itajaí).

It should be noticed that other partner institutions of the VISIR+ project have used the VISIR remote lab in similar courses. These implementations, plus the training actions done under the scope of the project, are presented in [12]-[18].

E. *Dissemination of the project to the associated partner institutions*

As foreseen in the project, the VISIR platform should be disseminated to the associated partner institutions. Thus, the IFSC Campus Florianópolis disseminated the project to the Campus Itajaí and Campus São José of IFSC and to the Regional University Foundation of Blumenau - FURB. To this end, the IFSC-VISIR project team traveled to the cities of São José, Itajaí and Blumenau to present the project.

In Itajaí the project was presented in August 2017 for six teachers and in São Jose and Blumenau the project was presented in August 2017, for 30 and 9 teachers, respectively. These presentations resulted in one implementation in the first semester of 2018, by a professor in a course at IFSC - Campus Itajaí.

At FURB we found again a bureaucratic issue. FURB may only use a system or a service from another institution if there is a signed formal agreement. Thus, during the course of 2017 an agreement was drawn up and in the beginning of 2018, it is being consolidated.

VIII. CONCLUSIONS

The need to improve teaching practices and teaching strategies has brought up the theme of searching for a teaching strategy in which the student is the center of the teaching learning process. In this perspective, remote laboratories have emerged as a tool from which students are instigated to construct knowledge at any time, with the available resources. In order to meet this technology of remote laboratories, the Brazilian legislation built several ways with the regulations of the EaD courses, which reinforced the importance of this approach to the teaching and learning process.

In the Latin American context, specifically the countries that are part of the VISIR+ Project, remote experimentation is still incipient compared to other countries in Europe, the United States and Oceania, for instance. In the case of IFSC, the effective use of the VISIR platform in regular courses since 2013 has brought benefits to students and teachers, as demonstrated in [1]. However, there are still several paradigm barriers to overcome. In the student's vision, about the benefits of this practice and in the teacher's view, about the need to adapt to new realities and innovations in teaching.

As part of the history of cooperation between IFSC and IPP, the participation in the VISIR+ Project was carried out in 2015 in order to disseminate the use of remote laboratories in Latin American countries. This cooperation was fundamental to enable the acquisition of the VISIR platform by IFSC, mainly due to the high cost of the system. Although economic viability was important, bureaucratic barriers proved to be a difficult issue at the project start. After solving bureaucratic problems, the acquisition and installation of the VISIR system at IFSC and the implementation of the didactic modules has started. The dissemination of the VISIR usage was carried out by the IFSC-VISIR team in order to increase the number of

accesses and the number of didactical modules. Despite of the efforts to spread VISIR platform to three different campuses of two distinct institutions (IFSC and FURB), only one campus uses the laboratory effectively. The resistance to innovations and adaptation to new realities is still present, although there has been a considerable increase in the number of accesses and subjects attended by the VISIR@IFSC remote laboratory. It is important to point out that the physical presence of the VISIR system at the IFSC facilities has led some teachers to demystify the remote use with something different from the traditional laboratory, which is verifiable by the increase on the courses served by VISIR platform.

In the process of implementing the VISIR remote laboratory at IFSC, several difficulties were pointed by the executing team. Some of them are the slowness in internal processes to accomplish partnership agreements and the approach that was used to enthrall new users. In this sense, it was concluded that bureaucratic processes are still a great barrier or at least a retarder in the implementation of partnerships. However, it is plausible to believe that, after the institution's first experience, future projects will not face the same difficulties. It is also concluded that teachers and students should be encouraged to use new technologies in teaching and learning, showing the importance of student participation in the learning process as an active agent in their course.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to acknowledge the support given by the European Commission through grant 561735-EPP-1-2015-1-PT-EPPKA2-CBHE-JP.

REFERENCES

[1] Schlichting, Luis C. M.; et al. Enriched scenarios for teaching and learning electronics. Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE) 2014, Bilbao, Spain. IEEE, 2014.

[2] Gustavsson, I. et al. On Objectives of Instrucional Laboratories, Individual Assessment, and Use of Collaborative Remote Laboratories. IEEE Transactions on Learning Technologies, v.2, nº4, p.263-273, oct.-dec. 2009.

[3] Herrera, Oriel A.; Alves, Gustavo R.; Fuller, David; AldunateRoberto G., Remote Lab Experiments: Opening Possibilities for Distance Learning in Engineering Fields. Proceedings of the Education for the 21 century - impact of ICT and Digital Resources Conference, 19th IFIP World Computer Congress 2006 (WCC'06), Joe Turner, Deepak Kumar. (Eds.), Santiago, Chile, Agosto 2006 pp. 321-325, Springer Boston, ISSN 1571-5736 (Print) 1861-2288 (Online), ISBN 978-0-387-34627-4.

[4] Using Remote Labs in Education: Two Little Ducks in Remote Experimentation. Editors: Javier Garcia- Zubia (Universidad de Deusto) and Gustavo R. Alves (Polytechnic of Porto). Universidad de Deusto, Bilbao, 2011. 22 chapters. 465 pp. ISBN 978-84-9830-335-3.

[5] Gustavsson, I. Student's Guide to the VISIR Remote Lab for Electrical Experiments. 2009. Available: <http://openlabs.bth.se/static/Student_manual5.pdf>. Acessed: feb. 6, 2015.

[6] Ma, J.; Nicherson, J. V. Hands-On, Simulated, and Remote Laboratories: A Comparative Literature Review. ACM Computing Surveys, v.38, nº 3, p.1-17, sep. 2006.

[7] Nedic, Zorica; Machotka, Jan; Nafalskt, Andrew. Remote Laboratories versus Virtual and Real Laboratories. Em: ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference, 33., 2003. Boulder: IEEE, 2003. p. 1-6.

[8] Tawfik, M. et al. Virtual Instrument Systems in Reality (VISIR) for Remote Wiring and Measurement of Electronic Circuits on Breadboard. IEEE Transactions on Learning Technologies, v.6, nº 1, p.60-72, 2013.

[9] Schlichting, Luis C. M.; Ferreira, Golberi de S., de Bona, Daniel D. de Faveri, Flavio Anderson, José A. Alves, Gustavo R., Remote Laboratory: Application and usability. Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE) 2016, Seville. Paper. Seville: IEEE, 2016

[10] Alves, Gustavo R. et al. Spreading remote lab usage a system — A community — A Federation, 2nd International Conference of the Portuguese Society for Engineering Education (CISPEE) 2016

[11] Alves, Gustavo R.; Gericota, Manuel G.; Silva, Juarez B.; and Bosco Alves, João. Chapter 1. "Large and Small Scale Networks of Remote Labs: a Survey", in: "Advances on remote laboratories and e-learning experiences". Editors: Luís Gomes (Universidade Nova de Lisboa) and Javier García-Zubía (Universidad de Deusto). Universidad de Deusto, Bilbao, 2007. pp. 15-34. ISBN 978-84-9830-077-2.

[12] Alves, Gustavo R. et al. (2017). Laboratórios Remotos no Ensino de Engenharia. Chapter 1, pp. 8-45, in DESAFIOS DA EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA: Formação Acadêmica e atuação Profissional, Práticas Pedagógicas e Laboratórios Remotos. / Vanderlí Fava de Oliveira, Adriana Maria Tonini e Sandra Rufino Santos – Organizadores – Brasília: ABENGE, 2017. 271p. ISBN: 978-85-64541-10-8.

[13] Evangelista, Ignacio et al. Active learning on DC circuits: spreading the use of VISIR remote lab in Argentina. 2nd IEEE World Engineering Education Conference (EDUNINE), Buenos Aires, Argentina, 11-14 March 2018.

[14] F. Soria, Mario et al. First practical steps on the educational activities using VISIR and remote laboratories at UNSE in partnership with UNED inside the VISIR+ Project. 2nd IEEE World Engineering Education Conference (EDUNINE), Buenos Aires, Argentina, 11-14 March 2018.

[15] Alves, Gustavo R. et al. Using a 3-tier Training Model for Effective Exchange of Good Practices in as ERASMUS+ Project. 12th annual International Technology, Education and Development Conference (INTED2018), Valencia, Spain, 5-7 March 2018.

[16] Pavani, Ana; Lima, Delberis A.; Temporão, Guilherme P.; Alves, Gustavo R. Different Uses for Remote Labs in Electrical Engineering Education: Initial Conclusions of an Ongoing Experience. International Conference on Interactive Mobile Communication Technologies and Learning (IMCL), 30 November – 1 December, 2017, Thessaloniki, Greece.

[17] Viegas, Clara et al. VISIR+ Project – Preliminary results of the training actions. 14th Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV) Conference, New York, NY, USA, 15-17 March 2017.

[18] Hernandez-Jayo, Unai; Garcia-Zubía, Javier; Colombo, Alejandro Francisco; Marchisio, Susana; Concari, Sonia Beatriz; Lerro, Federico; Pozzo, María Isabel; Dobboletta, Elsa; Alves, Gustavo R. Spreading the VISIR remote lab along Argentina. The experience in Patagonia. 14th Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV) Conference, New York, NY, USA, 15-17 March 2017.

Incorporación de VISIR en Ingeniería Electrónica: Una experiencia institucional en Argentina

Susana Teresa Marchisio
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario
Rosario, Argentina
smarch@fceia.unr.edu.ar

Federico Lerro
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario
Rosario, Argentina
flerro2@yahoo.com.ar

Claudio Merendino
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario
Rosario, Argentina
claudiomerendino@hotmail.com

Miguel Angel Plano
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario
Rosario, Argentina
mplanoster@gmail.com

Javier Garcia-Zubia
Facultad de Ingeniería
Universidad de Deusto
Bilbao, España
zubia@deusto.es

Daniel Crepaldo
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario
Rosario, Argentina
daniel.crepaldo@gmail.com

Sonia Beatriz Concari
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario
Rosario, Argentina
sconcari@fceia.unr.edu.ar

Luciano Rumin
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario
Rosario, Argentina
lucianorumin@gmail.com

Héctor Coscia
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario
Rosario, Argentina
hcoscia@fceia.unr.edu.ar

Franco Del Colle
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario
Rosario, Argentina
delcolle@fceia.unr.edu.ar

Daniel León
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario
Rosario, Argentina
drleon@fceia.unr.edu.ar

Javier Ghorghor
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario
Rosario, Argentina
javghor@fceia.unr.edu.ar

Unai Hernández-Jayo
Facultad de Ingeniería
Universidad de Deusto
Bilbao, España
unai.hernandez@deusto.es

Gustavo Alves
Politécnico do Porto
Instituto Superior de Engenharia
Porto, Portugal
gca@isep.ipp.pt

***Abstract*—A partir de la participación de la Universidad Nacional de Rosario (UNR) en el proyecto VISIR+, diversas asignaturas de la carrera Ingeniería Electrónica (IE) han incorporado experimentos con circuitos electrónicos basados en el laboratorio remoto VISIR. En esta comunicación se presentan tres implementaciones didácticas en asignaturas de la carrera IE de la UNR y se discuten los resultados de su evaluación. Más allá de posibles ajustes, los resultados son satisfactorios y alientan la continuidad de las implementaciones en las tres asignaturas.**

Keywords—Laboratorio remoto VISIR, aprendizaje de circuitos, diseños didácticos en Ingeniería Electrónica

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los pilares de la formación ingenieril es el trabajo de laboratorio. A través de la experimentación, se persiguen objetivos educativos de comprensión conceptual, desarrollo de habilidades de diseño, habilidades sociales relacionadas con el trabajo cooperativo y habilidades profesionales propias del *hands-on learning* [1]. Desde hace dos décadas, se han incorporado a la enseñanza de la ingeniería electrónica los denominados laboratorios remotos, con los cuales los estudiantes pueden experimentar sobre circuitos reales a través de Internet. Entre los más difundidos, pueden mencionarse el laboratorio del Massachusetts Institute of Technology desarrolló el iLabs, para la caracterización de dispositivos microeletrónicos [2], la Università degli Studi del Sannio, un laboratorio remoto para la enseñanza de mediciones electrónicas [3] y la Universidade Federal de Santa Catarina el RexLab con diversos experimentos [4], el de la University of East Sarajevo con un circuito de filtro T-notch [5], el de la National University of Ireland destinado a electrónica de potencia [6], el eLab del Instituto Tecnológico de Monterrey, con experimentos de circuitos clipping y circuitos amplificadores operacionales, además de circuitos eléctricos básicos y máquinas eléctricas [7], y el OpenLabs Electronics Laboratory del Blekinge Institute of Technology de Suecia [8], cuyo desarrollo Virtual Instrument Systems in Reality (VISIR) ha sido adoptado por numerosas instituciones educativas de diversos países [9] y modificado y mejorado por otras [10].

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

VISIR ha alcanzado una alta difusión a nivel mundial dado que posee como principal característica una alta sensación de inmersión. Si bien experimentar en forma remota no es equiparable a manipular los elementos e instrumentos en un laboratorio real, la implementación de los circuitos y la manipulación de los instrumentos de medición utilizando VISIR se realiza a través de pantallas con un diseño muy realista. Otra característica de gran atractivo es la versatilidad, pues para una misma configuración circuital, puede variarse algún componente cuyo valor resulte relevante y observar las variaciones en el circuito. Adicionalmente, como otros laboratorios remotos, la disponibilidad de 24 horas los siete días de la semana permite que el estudiante organice sus tiempos de acuerdo a sus necesidades. Asimismo, tal como ha sido reportado por otros autores [11] la plataforma VISIR puede admitir una gran cantidad de usuarios simultáneos. Como se sabe, los experimentos eléctricos por lo general se pueden realizar en subescalas de tiempo. La plataforma VISIR usa esta característica para permitir el acceso simultáneo de los estudiantes a un banco de trabajo en línea, pero desde más de una computadora al mismo tiempo. Por lo que, empleando VISIR, un mismo experimento puede ser realizado en simultáneo por distintos estudiantes sin percibirse retardos. Esto hace que no se requiera que el docente divida el curso en grupos para hacer varias sesiones repetidas del trabajo práctico [12].

Por otra parte, el empleo de VISIR puede permitir a instituciones que no puedan afrontar el costo de equipar un laboratorio, o no dispongan de espacio físico, insumos o personal técnico, o docentes suficientes, el acceso a experiencias de laboratorio. En todos los casos, y tal como ha sido reportado en otras publicaciones [13] [14] [15] [16], VISIR constituye una herramienta didáctica complementaria para la experimentación, pero no reemplaza el trabajo *hands-on* en el laboratorio tradicional.

En el marco del Proyecto VISIR+, convocatoria Erasmus+ 2015: Educación Superior – Desarrollo de la Capacidad Internacional, de la Comisión Europea, este laboratorio ha sido instalado en cinco instituciones de América Latina (AL) conformando junto a las instituciones europeas usuarias de VISIR, un consorcio destinado a difundir buenas prácticas educativas producto de la cooperación y el intercambio [17] [18]. Este trabajo tiene su origen en el Proyecto VISIR+ e involucra a tres asignaturas de la carrera Ingeniería Electrónica (IE) en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA), Universidad Nacional de Rosario (UNR), Argentina: Teoría de Circuitos (TC), Física de los Dispositivos Electrónicos (FDE) y Dispositivos y Circuitos Electrónicos I (DCE-I), todas pertenecientes al bloque de Tecnologías Básicas de la carrera IE. En todos los casos se trata de asignaturas formativas de competencias para el análisis de señales, dispositivos electrónicos y circuitos lineales y no lineales. Se ubican en el plan de estudios entre segundo y tercer año y, en conjunto, constituyen un tramo curricular conformado por asignaturas con dictados consecutivos y contenidos correlativos.

Este trabajo refiere a las implementaciones didácticas con VISIR de estas tres asignaturas en la FCEIA - UNR, una de las instituciones socias de América Latina en el Proyecto VISIR+. Las mismas tienen en común la búsqueda de alternativas didácticas que refuerzan el ineludible valor de la experimentación para el desarrollo de competencias en Ingeniería y el empleo de tecnologías basadas en Internet que facilitan espacios y momentos de aprendizaje flexibles con metodologías centradas en el estudiante.

En la siguiente sección se realiza una breve caracterización de las asignaturas y de sus dictados, destacando aquellos aspectos que, en ellas, llevaron a la incorporación curricular de VISIR. En la Sección III, se describen las implementaciones didácticas generadas por cada asignatura. Y posteriormente, en la Secciones IV y V, se presentan el diseño de la investigación, sus resultados y conclusiones preliminares.

II. Las asignaturas y las posibilidades de VISIR

A. *Teoría de Circuitos*

En el cuarto semestre de IE la asignatura TC introduce los conceptos, herramientas, modelos y métodos básicos para el análisis de circuitos eléctricos buscando generar criterios acerca del valor y aplicabilidad de leyes, métodos y diseños posibles. La asignatura sirve como fundamentación, directa o indirectamente, para varias asignaturas posteriores en los distintos campos de la IE (circuitos y sistemas electrónicos, señales, comunicaciones, control). En término de competencias, en esta asignatura se busca que el estudiante logre:

- Aplicar correctamente las leyes que rigen el comportamiento de los circuitos eléctricos.
- Analizar el comportamiento de un circuito real mediante la aplicación del modelo más conveniente de acuerdo al tipo de fuentes de alimentación en el circuito (continua, alterna o poliarmónica) y evaluar posteriormente la validez del modelo propuesto.
- Evaluar y seleccionar el método sistemático que mejor cumple con las necesidades de resolución de un problema.
- Vincular la física del problema con los resultados matemáticos obtenidos, para poder adoptar soluciones reales.
- Formular juicios críticos acerca del valor y aplicabilidad de las leyes, métodos y/o diseños posibles.

La asignatura no tiene asignada desde el plan de estudios una carga horaria específica para la realización de trabajos experimentales por lo que no se cuenta con un laboratorio propio para realizar trabajos prácticos sobre circuitos reales con supervisión docente. Además, la actual asignación del número de horas docentes y la cantidad de comisiones habilitadas para el dictado, así como los tiempos estimados por el plan de estudios para el normal cursado por parte de los estudiantes hacían que previa a la incorporación de VISIR fuera muy difícil la realización de trabajos experimentales sobre circuitos reales. En ese contexto, el análisis de validez de resultados obtenidos del cálculo sólo se basaba en razonamientos teóricos.

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

El disponer de VISIR en la institución representó para esta asignatura la posibilidad de incorporar la experimentación real en forma remota como recurso pedagógico para el análisis y la contrastación de resultados teóricos versus mediciones reales, haciendo uso de las horas docentes existentes y sin riesgo alguno de daños en los materiales empleados o riesgo eléctrico para los estudiantes. Con VISIR los estudiantes pueden además realizar las actividades en el horario que les resulte más conveniente y desde sus casas o dispositivos móviles; con apoyo docente vía mail o en horarios de consulta presenciales.

La incorporación curricular de VISIR en TC data del primer semestre 2017, replicándose la misma en el segundo semestre con modificaciones en los circuitos de trabajo. La utilización de VISIR se lleva a cabo en la modalidad de trabajo práctico, una vez que ya se han desarrollado el 75 % de los temas del programa de la asignatura. Esto es necesario a fin de que los estudiantes puedan reflexionar correctamente sobre los resultados obtenidos. A partir de incorporar la experimentación mediante el laboratorio remoto VISIR se busca: motivar a los estudiantes con actividades nuevas y mejorar la autonomía ya que pueden realizar ensayos por su cuenta, realizar experimentación sobre circuitos reales y mejorar la contrastación entre los cálculos teóricos y los resultados experimentales. Esto último permite introducir un nuevo concepto; el rango de validez de los modelos teóricos.

B. Física de los Dispositivos Electrónicos

FDE se ubica en el quinto semestre, y a partir de ella se aborda el estudio integral de dispositivos básicos del mundo electrónico, desde los fundamentos físicos hasta aplicaciones circuitales sencillas. Se busca que el estudiante no sólo comprenda la utilidad técnica de los dispositivos electrónicos básicos, sino también que los "construya"; que modele estructuras y dispositivos concretos, que descubra cómo estos funcionan, cómo se los polariza y cómo se los utiliza en circuitos de aplicación sencillos.

El tránsito de los estudiantes por la asignatura no es sencillo en términos de aprendizajes. Al respecto, se ha reportado que los estudiantes tienen serias dificultades al encarar el estudio de los Fundamentos de Electrónica [19]. Las mismas están asociadas a la complejidad que representa la comprensión de la operatoria de los circuitos electrónicos, principalmente debido a sus diferentes comportamientos dependiendo de la configuración, el tipo de señal y la carga especificada. Estas apreciaciones coinciden con las del equipo docente, quienes han observado, además, la dificultad que representa para los estudiantes pasar de la comprensión del funcionamiento físico de un dispositivo al análisis de sus curvas características y, más aún, a la integración del dispositivo en un circuito con fines específicos.

Los estudiantes cuentan con materiales didácticos variados: módulos escritos, guías de estudio y de actividades experimentales, simulaciones, un sistema hipermedia y un laboratorio remoto de desarrollo propio integrado en un sistema de gestión de aprendizajes de tecnología e-ducativa. La integración de recursos didácticos se enmarca en un proceso de enseñanza multimedial con metodologías activas, bajo la orientación y el seguimiento del equipo docente [20], [21].

En FDE se asigna gran importancia a la formación experimental, realizándose un total de 16 trabajos prácticos, entre actividades de laboratorio tradicional, laboratorio virtual y de acceso remoto. Se realizan actividades que van desde una introductoria destinada a que el estudiante tome contacto con el instrumental, hasta otras integradoras, como el diseño y ensayo de circuitos básicos con diodos y transistores.

En el laboratorio tradicional se realiza el análisis de curvas, cálculo de parámetros y modelización de variados dispositivos básicos, incluyendo el estudio de posibles usos. A su vez, las simulaciones que conforman el laboratorio virtual se integran en una actividad de diseño de diodos. Mientras, el laboratorio remoto desarrollado en la UNR se propone para facilitar el análisis de ciertos fenómenos de interés [20].

Dos de las actividades experimentales en laboratorio tradicional son las que involucran el diseño de circuitos con diodos y con transistores. Si bien al momento de realizar esta actividad los estudiantes cuentan con los conocimientos previos de teoría y de cálculo de circuitos, debe tenerse en cuenta que su recorrido curricular en el área de dispositivos electrónicos inicia en esta asignatura, dejando el espacio del laboratorio para el estudio de aplicaciones circuitales sencillas. Por lo que para los estudiantes se trata de una tarea desafiante y motivadora, pero a la vez, compleja. En este contexto, se propuso la inclusión curricular de VISIR introduciendo el estudio de la amplificación con BJT desde lo experimental. La primera implementación en esta asignatura data del segundo semestre de 2016, replicándose la misma en dos oportunidades en 2017, con leves modificaciones producto de las evaluaciones realizadas [22] [23].

C. Dispositivos y Circuitos Electrónicos I

El objeto de estudio de DCE-I, son los amplificadores lineales, tanto de señal como de potencia, y todos los conocimientos relacionados necesarios para su análisis, diseño, implementación, ensayo y caracterización en el laboratorio. La asignatura se ubica en el sexto semestre del ciclo profesional. Su contenido es científico - tecnológico fuertemente formativo y teórico práctico, con una equilibrada componente informativa respecto a los avances tecnológicos de actualidad. Sus objetivos generales son que el estudiante desarrolle competencias para:

- Analizar circuitos amplificadores de una o varias etapas estableciendo su funcionalidad, sus ventajas y limitaciones, y su respuesta a distintos tipos de excitaciones
- Diseñar, simular, implementar e interconectar circuitos amplificadores tanto de señal como etapas de potencia utilizando herramientas adecuadas
- Identificar los parámetros que caracterizan el funcionamiento de los amplificadores, proyectar y realizar ensayos de laboratorio para obtener dichos parámetros y elaborar un informe a nivel profesional que incluya las conclusiones obtenidas.
- Identificar y utilizar correctamente los instrumentos de laboratorio para el ensayo y la caracterización de circuitos electrónicos.

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

- Trabajar en equipo.

La asignatura está directamente relacionada con el diseño y el análisis de circuitos electrónicos. El cursado contempla clases colectivas para todos los estudiantes en las cuales se desarrollan los fundamentos teóricos, ejemplos de aplicación y experiencias de aprendizaje que pueden ser parte de los trabajos prácticos obligatorios, y clases presenciales en el Laboratorio de Electrónica, en las cuales se realizan experiencias de aprendizaje que incluyen experimentación sobre circuitos. Así, se llevan a cabo un conjunto de trabajos prácticos organizados alrededor del análisis o diseño de circuitos planteados como problemas, algunos de los cuales incluyen ensayos de laboratorio. Cada trabajo conlleva una memoria o registro que los estudiantes entregan al finalizar el mismo. Los trabajos son evaluados con una calificación conceptual.

En el segundo semestre del 2017, el equipo docente, interesado en evaluar las posibilidades de VISIR para el dictado de la materia, planteó como primera experiencia de cátedra, la incorporación de una actividad de laboratorio sencilla, suficientemente conocida, introductoria y motivadora. La actividad en cuestión se venía realizando en forma presencial en el Laboratorio de Electrónica de la Facultad. En el caso del trabajo práctico tradicional la actividad se realizaba en grupos de 3 estudiantes, con un informe común. Para la realización con VISIR la actividad se planteó de realización individual.

III. Las implementaciones didácticas

A. *VISIR en Teoría de Circuitos*

La actividad utilizando LR se planteó en formato Trabajo Práctico y para su realización los estudiantes descargan una guía de laboratorio con varios circuitos que deben ensayar. Cada disposición circuital propuesta está relacionada con un tema de algún capítulo del programa analítico de la asignatura.

Dos de los problemas propuestos para su realización con VISIR fueron: “Evolución temporal transitoria en un circuito de segundo orden RLC” y “Corrección de factor de potencia”.

Cada problema tiene una parte de cálculos teóricos previos que debe contrastarse con las mediciones realizadas sobre el circuito real. Para realizar el estudio de la evolución transitoria en un circuito RLC (Fig. 1) se utilizó una alimentación de onda cuadrada.

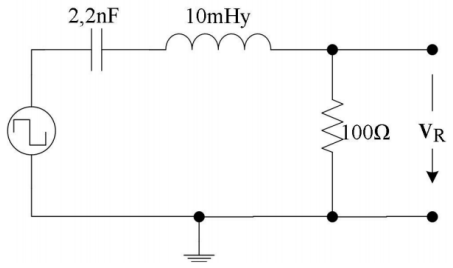


Fig. 1. Circuito RLC a ensayar para el estudio de la evolución temporal transitoria

En cada semiciclo podemos pensar que se tiene una fuente de continua (de valores + Vcc y - Vcc) y condiciones iniciales en el capacitor y la inductancia que dependen del semiciclo anterior.

El estudio se planteó con una frecuencia que permite que en cada semiciclo se extinga por completo la evolución transitoria que es de tipo sobreamortiguada. Esto permite medir sobre el osciloscopio el tiempo de amortiguamiento y la frecuencia de oscilación y reflexionar sobre cómo se vinculan estos parámetros con los valores de los componentes del circuito

En la segunda actividad con VISIR los estudiantes debieron ensayar un circuito que opera en régimen permanente senoidal y ver el efecto de la incorporación de un capacitor (Fig. 2).

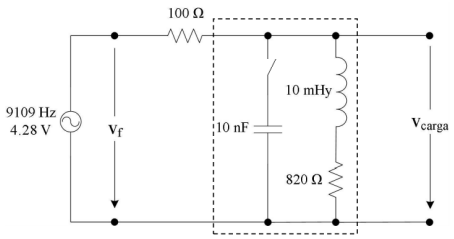


Fig. 2. Circuito para el estudio de la Corrección de factor de potencia

Este segundo circuito intenta representar en forma simplificada la interconexión entre un generador y una carga de carácter inductivo, que se muestra recuadrada en línea punteada, a través de una línea de transmisión (R = 100 ohm).

En este caso se busca reforzar el concepto estudiado en la parte teórica del curso acerca de cómo la incorporación de elementos capacitivos (para el caso de cargas con carácter inductivo) permite reducir el valor eficaz de la corriente consumida por la carga, que a su vez circula por la línea. Esto implica por tanto que las pérdidas en la transmisión se minimizan.

El informe se completa con los cálculos teóricos, las mediciones realizadas y formas de onda visualizadas en los ensayos. Una vez completado, se acuerda un encuentro presencial con algún profesor para la realización de una instancia de preguntas sobre el trabajo realizado. Para poder rendir el examen final de síntesis de la materia es condición necesaria tener aprobado el trabajo práctico. Los estudiantes eligen el momento de entrega del informe; y en muchos casos aprueban el trabajo práctico con VISIR en el examen final.

B. *VISIR en Física de los Dispositivos Electrónicos*

La actividad con integración del laboratorio VISIR se planteó a los estudiantes como integradora del trabajo de laboratorio, de realización individual y obligatoria. Los docentes presentaron el sistema VISIR en una sesión demostrativa, explicando a los estudiantes en qué consistía la actividad a realizar, las características de VISIR y cómo acceder al manual. Se facilitaron los usuarios para ingresar al LR en el entorno VISIR de la UD y se propuso a los estudiantes un plazo máximo de dos semanas para el envío del

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

informe al profesor. Durante el proceso se evacuaron dudas por correo electrónico y en forma presencial.

La actividad se denominó: "Ensayo de un circuito amplificador básico con transistores con Laboratorio Remoto VISIR". Las consignas fueron entregadas por escrito y combinaron preguntas preliminares de análisis teórico de los circuitos y actividades de mediciones circuitales utilizando VISIR. Los estudiantes estaban familiarizados con el uso de protoboard reales y con el armado y diseño de circuitos básicos con transistores por otros trabajos en el laboratorio tradicional.

En la primera parte de la actividad se propuso el circuito a ensayar (Fig. 3), requiriéndose un primer análisis circuital con fuente de continua a los fines de que los estudiantes: a) Identificaran el modo de conexión, b) Establecieran el punto de trabajo, c) Determinaran la recta de carga y d) Indicaran cómo harían para medir experimentalmente los valores obtenidos.

Una vez realizados los cálculos analíticos, los estudiantes debieron armar el circuito en el protoboard de VISIR (Fig. 3). Empleando el mismo se les solicitó: a) Verificar los resultados obtenidos teóricamente y b) Inferir sobre posibles diferencias en los resultados experimentales.

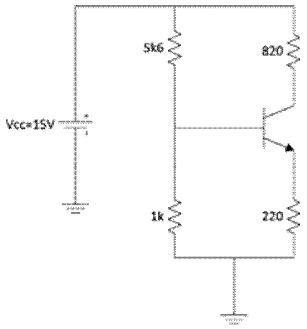


Fig. 3. Circuito propuesto para la primera parte de la actividad con VISIR

En la segunda parte de la actividad con VISIR se propuso el circuito básico de amplificador de pequeña señal (Fig. 4).

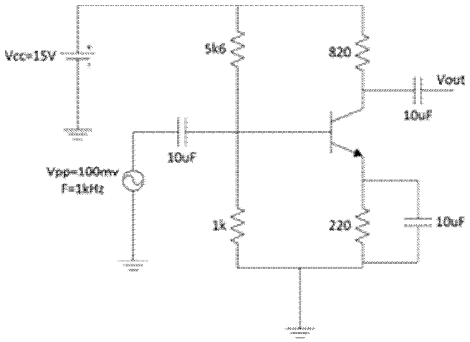


Fig. 4. Circuito propuesto para la segunda parte de la actividad con VISIR

Los estudiantes debían: a) Ensayar el circuito, b) Observar su comportamiento variando frecuencia y amplitud de la señal, con y sin el uso de capacitor de desacople; c) Responder acerca de la función que cumplen en el circuito todos los capacitores y d) Explicar por qué las conexiones de entrada y salida de señal se ubican de la manera propuesta.

C. VISIR en Dispositivos y Circuitos Electrónicos I

Se realizó un trabajo práctico denominado "Ensayo de un circuito RC mediante laboratorio remoto". El mismo consiste en el estudio del comportamiento de un circuito RC (Fig. 5) conectado tanto como pasaaltos como pasabajos para un rango de frecuencias por encima y por debajo de la frecuencia de corte, así como la visualización de la que se produce para ondas no senoidales (en particular la onda cuadrada) cuando éstas atraviesan estos circuitos. Más allá de la sencillez de los circuitos, se busca hacer hincapié en el análisis del comportamiento de los mismos a los fines de retomar, durante el cursado, el estudio de la respuesta en frecuencia en el caso de circuitos amplificadores.

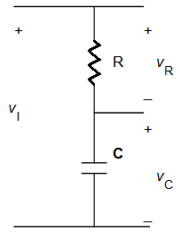


Fig. 5. Circuito RC propuesto para la actividad con VISIR en DCEI

Con el empleo de VISIR se solicitó a los estudiantes:

1- Reconocer y familiarizarse con el laboratorio remoto. Esto implicó aprender a utilizar el Osciloscopio y el Generador de Señales, visualizando ondas senoidales y cuadradas de diferente amplitud y frecuencia.

2- Estudiar el circuito integrador o pasabajos: Determinar la frecuencia de corte por medio de ondas senoidales y cuadradas (método del tiempo de respuesta) e identificar las formas de onda típicas para excitaciones a) en la frecuencia de corte, b) muy por debajo y c) muy por encima de la misma.

3- Estudiar el circuito derivador o pasaaltos: Determinar la frecuencia de corte por medio de ondas senoidales y cuadradas (método de la flecha) e identificar las formas de onda típicas para excitaciones: a) en la frecuencia de corte, b) muy por debajo y c) muy por encima de la misma.

4- Extraer conclusiones, comparando los resultados obtenidos con VISIR con los cálculos teóricos correspondientes en función de los dispositivos utilizados.

Una vez realizados los ensayos, cada estudiante elaboró individualmente un informe impreso con los resultados y comentarios sobre los resultados obtenidos.

IV. RECOLECCIÓN DE DATOS

Dado el interés por conocer la valoración que estudiantes y profesores hacen en cada espacio curricular sobre la eficacia de VISIR como recurso de aprendizaje, se recurrió a la realización de dos tipos de encuestas: "Cuestionario de Satisfacción del Estudiante" y "Cuestionario de Satisfacción del Profesor", con

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

el posterior análisis de las opiniones de los estudiantes y los profesores respectivamente.

Ambos cuestionarios fueron diseñados y validados [24] por integrantes del Proyecto VISIR+, responsables del Work Package 3, pertenecientes al Politécnico de Porto (IPP), Portugal y al Instituto Rosario de Investigación en Ciencias de la Educación (IRICE), de Argentina.

El "Cuestionario de Satisfacción del Estudiante" se compone de 20 ítems, escala Likert 1 a 4, donde 4 corresponde a "muy de acuerdo" y 1 a "no acuerdo", además de 2 preguntas abiertas.

La respuesta al mismo fue solicitada a los estudiantes luego de enviar al profesor por e-mail los informes escritos de las experiencias realizadas.

Las preguntas incluidas en el cuestionario fueron re categorizadas en este caso según cuatro aspectos o dimensiones de análisis. Estas son:

- D1. Aprendizajes percibidos por los propios estudiantes;
- D2. Aceptación de VISIR;
- D3. Limitaciones técnicas o de tiempo para emplear VISIR;
- D4. Orientación docente percibida por el propio estudiante para el desarrollo de la actividad con VISIR.

Dado el interés del presente trabajo, el análisis se focaliza sobre aquellas preguntas de este cuestionario que brindan información acerca de la dimensión D1. Aprendizajes percibidos por los propios estudiantes.

El "Cuestionario de Satisfacción del Profesor" se compone de 10 preguntas, 9 de ellas con 3 opciones de respuestas (si, medianamente, no) y una pregunta abierta destinada a valorar globalmente la implementación.

El cuestionario incluyó además un espacio para que el profesor vuelque en él comentarios sobre el desempeño general de los estudiantes. Todo ello se complementa con la observación de logros de aprendizaje en los informes individuales realizados por los estudiantes.

V. Resultados

A. Caso Teoría de Circuitos

Participaron de la experiencia el profesor responsable de la implementación y 47 estudiantes que cursaron la asignatura durante 2017, correspondiendo 11 al primer semestre y el resto al segundo semestre.

Los resultados que se exponen corresponden a los 30 estudiantes que respondieron voluntariamente el "Cuestionario de Satisfacción del Estudiante". La Tabla I muestra los resultados con las siguientes opciones de respuesta: "No Acuerdo" (NA), "Acuerdo Parcialmente" (AP), "Acuerdo" (A), "Acuerdo Totalmente" (AT) para el caso de la asignatura TC.

TABLA I

CASO TC: CUESTIONARIO DE SATISFACCIÓN DEL ESTUDIANTE

APRENDIZAJES PERCIBIDOS. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL SEGÚN ACUERDO

		NA (1)	AP (2)	A (3)	AT (4)
P1	VISIR me ayudó a comprender mejor temas de la materia	3,3%	20,0%	56,7%	20,0%
P2	Probé los experimentos varias veces si los resultados me parecían extraños	6,7%	6,7%	33,3%	53,3%
P3	Creo que puedo manejar el laboratorio remoto muy bien	3,3%	23,3%	63,3%	10,0%
P4	Creo que puedo resolver muchos problemas de electricidad reales	0,0%	56,7%	43,3%	0,0%
P5	Pude utilizar los conceptos científicos para explicar los resultados de los experimentos	0,0%	6,7%	40,0%	53,3%

Por su parte, en el "Cuestionario de Satisfacción del Profesor" el profesor expone que valora como cualidades de VISIR: la alta sensación de inmersión, versatilidad, flexibilidad horaria, simultaneidad y economía.

Al respecto, refiriéndose a la inmersión, destaca que *"Si bien el LR no puede reemplazar la experimentación en un laboratorio real, la posibilidad de manipular los instrumentos de medición y la forma de implementar los circuitos es cuasi real"*.

Ya aludiendo a la versatilidad, expresa que *para una misma configuración circuital puede variarse una resistencia (o algún otro componente que resulte interesante) y observar sus consecuencias"*.

Asimismo, reconociendo la disponibilidad en el acceso a Internet desde diversos dispositivos, el profesor se manifestó positivamente en relación con: a) *la posibilidad de que el estudiante decida y organice sus tiempos de acuerdo a su conveniencia,* b) *la ventaja de no tener que dividir el curso en grupos para hacer varias sesiones repetidas del trabajo práctico* y c) *la no necesidad de comprar equipamiento para poder implementar los trabajos prácticos.*

Como única complejidad se menciona que dado que los estudiantes nunca habían utilizado VISIR fue necesario realizar una Clase de Inducción donde los alumnos aprenden a ingresar en el entorno del LR y realizan algunos ejemplos sencillos sobre cómo medir utilizando Amperímetro, Voltímetro y Osciloscopio.

B. Caso Física de los Dispositivos Electrónicos

Los dos profesores responsables de laboratorio y 45, sobre un total de 51 estudiantes que cursaron la asignatura en alguno de los tres semestres en los que se implementó la experiencia respondieron los respectivos cuestionarios.

La Tabla II muestra los resultados del "Cuestionario de Satisfacción del Estudiante", con las opciones de respuesta:

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

"No Acuerdo" (NA), "Acuerdo Parcialmente" (AP), "Acuerdo" (A), "Acuerdo Totalmente" (AT)

TABLA II

CASO FDE: CUESTIONARIO DE SATISFACCIÓN DEL ESTUDIANTE

APRENDIZAJES PERCIBIDOS. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL SEGÚN ACUERDO

		NA (1)	AP (2)	A (3)	AT (4)
P1	VISIR me ayudó a comprender mejor temas de la materia	4,4 %	24,4%	55,6%	15,6%
P2	Probé los experimentos varias veces si los resultados me parecían extraños	8,9%	11,1%	40,0%	40,0%
P3	Creo que puedo manejar el laboratorio remoto muy bien	6,7%	22,2%	46,7%	24,4%
P4	Creo que puedo resolver muchos problemas de electricidad reales	6,7%	35,6%	44,4%	13,3%
P5	Pude utilizar los conceptos científicos para explicar los resultados de los experimentos	0,0%	2,2%	55,6%	42,2%

Del análisis del "Cuestionario de Satisfacción del Profesor" surgen valoraciones positivas por parte de los profesores de FDE que intervinieron en la experiencia. Específicamente, destacan que los trabajos presentados por los estudiantes fueron satisfactorios.

Uno de los profesores manifiesta en el cuestionario:

"VISIR permite enfatizar más en el desarrollo de circuitos o dispositivos puntuales, habiendo previamente utilizado las herramientas de banco en el laboratorio tradicional"

…. "El laboratorio remoto les permitió tener más tiempo para probar y evaluar múltiples opciones"…

"Es importante destacar que los estudiantes determinaron la respuesta del circuito, aun cuando no tenían conocimientos sobre amplificación"

Mientras el otro profesor expresa*:*

"Es un complemento ideal en la enseñanza. Le da libertad al alumno de probar fuera de los límites específicos del problema planteado o como herramienta de aprendizaje para realizar prueba y error en un entorno controlado."

Revisando las entregas de los estudiantes, puede afirmarse que los 17 estudiantes pudieron cumplimentar con lo solicitado, acompañando las explicaciones con instantáneas tomadas de la interfaz cliente de VISIR (Fig.5 y Fig. 6).

Por otra parte, más allá de las actividades que se les propuso, algunos estudiantes probaron variantes en el circuito y en la entrada, respondiendo más a su propia curiosidad que a la consigna.

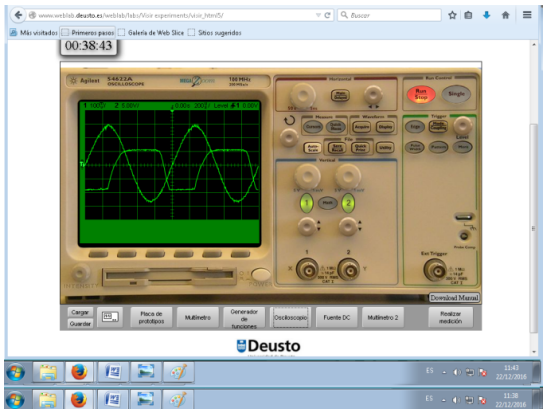


Fig. 5. Imagen recuperada de un informe. Análisis del comportamiento del circuito con capacitor

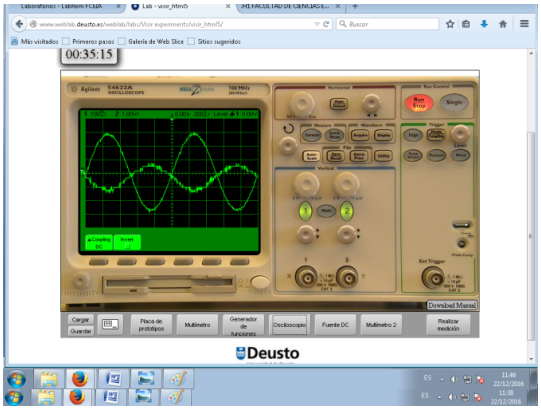


Fig. 6. Imagen recuperada de un informe. Análisis del comportamiento del circuito sin capacitor

C. Caso Dispositivos y Circuitos Electrónicos I

Participaron de la experiencia dos profesores y los 49 estudiantes que iniciaron el cursado de la asignatura en el segundo semestre de 2017.

La Tabla III muestra los resultados de la aplicación del "Cuestionario de Satisfacción del Estudiante". Los mismos corresponden a los 12 que voluntariamente respondieron el mismo, al finalizar el cursado.

Ninguno de los estudiantes manifestó haber tenido problema alguno para realizar la actividad.

Desde el punto de vista de la comprensión alcanzada sobre los circuitos ensayados, los profesores manifiestan que la misma no difiere respecto de la alcanzada cuando los mismos circuitos se estudiaban en el laboratorio tradicional. Sin embargo, a diferencia de esto último, en el caso de la implementación de la experiencia con VISIR, cada estudiante tuvo que hacer y entregar su propio informe. En este contexto se considera que el empleo de VISIR representa una mejora pues esto en general induce al estudiante a involucrarse en mayor medida en el tema de estudio.

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

TABLA III

CASO DCE-I: CUESTIONARIO DE SATISFACCIÓN DEL ESTUDIANTE

APRENDIZAJES PERCIBIDOS. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL SEGÚN ACUERDO

		NA (1)	AP (2)	A (3)	AT (4)
P1	VISIR me ayudó a comprender mejor temas de la materia	8,3%	33,3%	41,7%	16,7%
P2	Probé los experimentos varias veces si los resultados me parecían extraños	8,3%	8,3%	50%	33,4%
P3	Creo que puedo manejar el laboratorio remoto muy bien	16,7%	33,3%	41,7%	8,3%
P4	Creo que puedo resolver muchos problemas de electricidad reales	25%	25%	33,3%	16,7%
P5	Pude utilizar los conceptos científicos para explicar los resultados de los experimentos	8,3%	16,7%	58,3%	16,7%

En cuanto a las opiniones de los profesores, uno de ellos señala:

"*La principal ventaja es que mediante una herramienta virtual, el alumno puedo observar el comportamiento de los circuitos reales, sin pérdidas de tiempo y sin afectar la integridad de componentes ni equipos*".

Mientras, el otro profesor marca como ventaja que "*los alumnos participan en forma individual, y en cualquier horario que les convenga*" y como desventaja "*la poca disponibilidad de componentes electrónicos en el laboratorio remoto, lo que limita el rango de experimentos que se pueden hacer*".

Ambos indicaron que no detectaron dificultades de importancia para realizar la experiencia.

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados que se exponen se asumen como propios de una primera evaluación. Sin embargo, cabe destacar algunos aspectos que surgen del análisis, a modo de conclusiones.

La revisión de las actividades desarrolladas con el empleo de VISIR en las tres asignaturas permite afirmar que en todos los casos se combinó cálculo con actividad experimental. Asimismo, se observa que el laboratorio remoto fue empleado, según el caso, como recurso para la contrastación, el análisis preliminar, el descubrimiento de fenómenos y/o la motivación.

Analizando las respuestas al cuestionario a estudiantes pueden observarse, comparativa y globalmente, similitudes en el comportamiento de los valores de algunas preguntas y diferencias en otras, según la asignatura considerada.

Con referencia a lo segundo, se observa que la distribución de los valores de las respuestas de los estudiantes a las preguntas P3 y P4 en la asignatura DCE-I (Tabla III) difiere respecto de la correspondiente a las asignaturas TC (Tabla I) y FDE (Tabla II). En particular, con referencia a la pregunta P3, en la asignatura DCE-I, un 16.7% de los estudiantes percibe que no ha logrado aprender el manejo del VISIR luego de realizada la experiencia, mientras que en las otras dos asignaturas, el porcentaje de estudiantes que seleccionaron la opción NA a la misma pregunta es sensiblemente inferior. Sin embargo, los profesores de DCE-I afirman que en el momento de realizar la actividad, ninguno de los estudiantes manifestó tener inconvenientes en utilizar el sistema VISIR para realizar las experiencias propuestas.

Todo lo anterior induce a pensar que más allá de haber resuelto la actividad satisfactoriamente, implicando con ello el poder sostener el "diálogo" necesario con el sistema VISIR, en DCE-I hubo estudiantes que, en número relativamente mayor al de TC y FDE, no llegó a percibir que dominaba su manejo.

Por otra parte, resulta evidente la confianza de los estudiantes en las bondades del sistema como ayuda para comprender los temas de las asignaturas, para aplicar los conceptos científicos y para chequear posibles resultados extraños.

Otra pregunta en la que se observan diferencias entre asignaturas es la P4, con un 25% de estudiantes que selecciona el valor NA en DCE-I frente al 6,7% en FDE y 0% en TC. Estas diferencias merecen ser mejor estudiadas. Se estima que las mismas pueden estar asociadas a uno o varios factores, desde lo motivacional, pasando por el tipo de ensayo y su inserción en la asignatura, el objetivo perseguido por el equipo de docentes al decidir la inclusión de VISIR en esta implementación, y hasta el desfasaje de tiempo entre el momento en el que los estudiantes respondieron la encuesta respecto al momento de realización de la actividad experimental, entre otros.

Al respecto, cabe recordar que, en DCE-I, el circuito implementado fue muy sencillo, que al mismo se le asignó una valoración de trabajo instroductorio, con fecha de realización al inicio del dictado de la asignatura. En este caso los estudiantes que respondieron la encuesta lo hicieron voluntariamente, eligiendo incluso el momento para hacerlo durante los cuatro meses que duró la cursada. Por lo mismo hubo quienes respondieron luego de haber realizado en el hand on laboratory los restantes trabajos experimentales, en su mayoría de mayor complejidad circuital, y asociados con los contenidos focales de la asignatura.

Esta situación fue claramente diferente en DCE-I respecto de las otras implementaciones, en las que, en cada caso, la realización de las actividades con VISIR se produjo al finalizar el dictado de las asignaturas y con el objetivo de favorecer la integración de conocimientos. Más aún, en el caso de TC la actividad con VISIR, única de carácter experimental en el diseño curricular de asignatura, fue parte constitutiva de la evaluación globalizadora final.

Por su parte, los profesores involucrados en las implementaciones manifestaron que no se detectaron dificultades de importancia y al mismo tiempo, aspiran a contar con una mayor variedad de dispositivos para realizar más experimentos.

Esta inquietud será canalizada satisfactoriamente en las próximas implementaciones dado que se han instalado recientemente en la institución, módulos VISIR

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

complementarios que amplían el número de plaquetas, instrumental y dispositivos disponibles para el armado de circuitos más complejos.

Más allá de posibles ajustes, los resultados que surgen de esta investigación, tanto en lo que refiere a la satisfacción de docentes y estudiantes como con relación a los aprendizajes percibidos y logrados, alientan la continuidad de las implementaciones.

La versatilidad en los empleos informados permite pensar a VISIR como un recurso educativo cumpliendo roles diversos: a) como una aproximación gradual al trabajo en el laboratorio tradicional de forma tal que al llegar al mismo, el estudiante esté familiarizado con los elementos que va a encontrar en él; b) como medio para contrastar resultados obtenidos ya sea en el laboratorio tradicional como mediante simulaciones, o c) como recurso idóneo, integrable con otras estrategias y recursos para el desarrollo de competencias experimentales.

En todos los casos, y al margen del mayor o menor grado de consolidación que en cada asignatura se pueda observar con referencia a la incorporación curricular de VISIR, lo realizado se valora positivamente desde lo institucional, significando una tarea colectiva con implicación directa de grupos docentes de diferentes cátedras hacia la innovación de las enseñanzas. También en términos institucionales, es claro que el empleo de VISIR como un recurso compartido por varias asignaturas permite optimizar el uso del LR y hacerlo más eficiente. Por una parte, un único administrador es quien coordina cómo generar la mayor cantidad de circuitos que pueden ensayarse; por otra, es esperable que los profesores y estudiantes, como una comunidad creciente de usuarios, cada vez más familiarizados con el recurso, lo aprovechen de manera cada vez más creativa, mientras se gana en eficiencia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el respaldo de la Comunidad VISIR como así también el apoyo económico provisto por la Comisión Europea a través del Proyecto 561735-EPP-12015-1-PTEPPKA2-CBHE-JP.

REFERENCES

[1] R. V. Krickasand and J. Krivickas, “Laboratory Instruction in Engineering Education”, Global J. of Eng. Educ., Vol.11, No.2, 2013, pp 191-196.

[2] http://ceci.mit.edu/projects/iLabs/ (Consultado 21/02/18).

[3] G. Canfora, P. Daponte and S. Rapuano, “Remotely accessible laboratory for electronic measurement teaching”, Computer Standards & Interfaces, Elsevier, vol. 26, n. 6, 2004, pp 489–499.

[4] J. M. Neto, S. Paladini, C. E. Pereira, R. Marcelino, V. Gruber and J. B. Silva, “Remote Educational Experiment Applied To Electrical Engineering”, International Journal of Online Engineering, vol. 9, n. 1, February 2013, pp 47-51.

[5] B. Popović, N. Popović, D., Mijić, S. Stankovski. and G. Ostojić, “Remote control of laboratory equipment for basic electronics courses: A LabVIEW-based implementation”, Comput. Appl. Eng. Educ., 21: E110–E120, 2007, doi: 10.1002/cae.20531

[6] W. G. Hurley and Ch. K. Lee, “Development, Implementation, and Assessment of a Web-Based Power Electronics Laboratory”, IEEE Transactions on Education, Vol. 48, No. 4, November 2005, pp 567-573

[7] http://elab.mty.itesm.mx/ (Consultado 21/02/18).

[8] I. Gustavsson, “A traditional electronics laboratory with Internet access", Proceedings of the International Conference on Networked e-learning for European Universities in Granada, Spain, 23-25th November 2003, ISBN 9090175148 - Publisher EUROPACE.

[9] G. Alves, A. Fidalgo, M. A. Marques, C. Viegas, M. Felgueiras, R. Costa, N. Lima, M. Castro, J. Garcia-Zubia, U. Hernández-Jayo, M. Castro, G. Díaz-Orueta, A. Pester, D. Zutin, W. Kulesza, E. San Cristobal Ruiz, F. García-Loro, I. Gustavsson, L. Schlichting, G. Ferreira, D. de Bona, J. B. da Silva, J. B. Alves, S. Biléssimo, A. Pavani, D. Lima, G. Temporao, S. Marchisio, S. Concari, F. Lerro, R. Fernández, H. Paz, F. Soria, N. Almeida, V. de Oliveira, M. I. Pozzo and E. Dobboletta "Spreading remote labs usage: A System – A Community – A Federation," in Proceedings of the 2nd International Conference of the Portuguese Society for Engineering Education (CISPEE2016), Vila Real, Portugal, 2016.

[10] J. García-Zubia, J. Cuadros, S. Romero, U. Hernandez-Jayo, P. Orduña, M. Guenaga, L. González-Sabate, I. Gustavsson, “Empirical Analysis of the Use of the VISIR Remote Lab in Teaching Analog Electronics”, *IEEE Transactions on Education*, vol. 60, n. 2, May 2017.

[11] G. R. Alves, M. A. Marques, M. C. Viegas, M. C. Costa-Lobo, R. G. Barral, R. J. Couto, F. L. Jacob, C. A. Ramos, G. M. Vilão, D. S. Covita, J. A. Alves, P. S. Guimarães, I. Gustavsson, “Using VISIR in a Large Undergraduate Course: Preliminary Assessment Results”, *International Journal of Engineering Pedagogy*, Vol 1, No 1, 2011

[12] I Gustavsson, G Alves, R Costa, K Nilsson, J Zackrisson, U Hernandez-Jayo, J Garcia-Zubia. The VISIR Open Lab Platform 5.0 -an architecture for a federation of remote laboratories. *8th International Conference on Remote Engineering and Virtual* Instrumentation (REV2011).

[13] A. Marques, C. Viegas, C. Costa-Lobo, A. Fidalgo, G. Alves, J. Rocha and I. Gustavsson, "How Remote Labs Impact on Course Outcomes: Various Practices Using VISIR," IEEE Transactions on Education, 2014.

[14] N. Lima, C. Viegas, G. Alves and F. Garcia-Peñalvo, "VISIR's Usage as a Learning Resource: a Review of the Empirical Research," in *Proceedings TEEM2016 - Fourth International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality (TEEM’16)*, Salamanca, Spain, 2016.

[15] Ignacio Evangelista, Juan Farina, Matías Cadierno, Gabriel Roldán, María Isabel Pozzo, Elsa Dobboletta, Javier García Zubía, Unai Hernández, Gustavo R. Alves, Susana Marchisio, Sonia Concari, Kristian Nilsson, "Active learning on DC circuits: spreading the use of VISIR remote lab in Argentina", 2nd IEEE World Engineering Education Conference (EDUNINE), Buenos Aires, Argentina, 11-14 March 2018

[16] Hernandez-Jayo, Unai; Garcia-Zubía, Javier; Colombo, Alejandro Francisco; Marchisio, Susana; Concari, Sonia Beatriz; Lerro, Federico; Pozzo, María Isabel; Dobboletta, Elsa; Alves, Gustavo R., "Spreading the VISIR remote lab along Argentina. The experience in Patagonia", 14th Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV) Conference, New York, NY, USA, 15-17 March 2017

[17] Clara Viegas, Gustavo R. Alves, Maria Arcelina Marques, Natércia Lima, Manuel Felgueiras, Ricardo Costa, André Fidalgo, Maria Pozzo, Elsa Dobboletta, Javier García-Zubía, Unai Hernández-Jayo, Manuel Castro, Felix García-Loro, Danilo Zutin, Christian Kreiter, ”VISIR+ Project – Preliminary results of the training actions”, 14th Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV) Conference, New York, NY, USA, 15-17 March 2017

[18] G. Alves, A. Fidalgo, M. Marques, M. Viegas, M. Felgueiras, R. Costa, N. Lima1, W. Kulesza, J. Zubía, M. Castro, A. Pester, A. Pavani, J. Silva, L. Schlichting, S. Marchisio, R. Fernández, V. Oliveira, M. Pozzo, "Using a 3-tier Training Model for Effective Exchange of Good Practices in as ERASMUS+ Project," 12th annual International Technology, Education and Development Conference (INTED), Valencia, Spain, 5-7 March 2018.

[19] F. D. Trujillo-Aguilera, P. J. Sotorrío-Ruiz, A. Pozo-Ruz. “A new challenge in the Electronics teaching/learning process for the Industrial Design Engineering Bachelor. EDUCON 2007.

[20] F. Lerro, S. Marchisio y C. Merendino, “Innovando Prácticas de Enseñanza y de Evaluación de Aprendizajes con Empleo de Laboratorio Remoto”, en Actas TAEE 2016, Sevilla, España. URL: http://www.taee2016.org/index.php/es/actas

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

[21] Federico Lerro, Pablo Orduña, Susana. Marchisio and Javier García-Zubía, “Development of a Remote Laboratory Management System and Integration with Social Networks”. International Journal of Recent Contributions from Engineering, Science & IT (iJES) Vol 2, No 3, 2013, pp 33-37. http://online-journals.org/index.php/i-jes/article/view/3821

[22] Susana. Marchisio, Federico Lerro, Claudio Merendino, Miguel Plano, Sonia Concari, Gastón Saez de Arregui, Javier García Zubía, Unai Hernández Jayo, Gustavo Alves and Ingvar Gustavsson, “Starting the Study of Electronic Circuits with VISIR. College students’ viewpoints in a Pilot Test in Argentina”, 4th Experiment@ International Conference (exp.at'17), Faro, Portugal, 2017, pp 18-23. doi: 10.1109/EXPAT.2017.7984385 URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7984385&isnumber=7984334

[23] S. Marchisio, F. Lerro, C. Merendino, M. Plano, S. Concari, C. Arguedas, J. García-Zubía, U. Hernández-Jayo, G. R. Alves, “Acerca de la eficacia de VISIR como recurso en temas de electrónica circuital en Argentina”, 1er. Congreso Latinoamericano de Ingeniería (CLADI 2017). Entre Ríos, Argentina, 13-15, Sept., 2017

[24] M. I. Pozzo, E. Dobboletta, M. C. Viegas, M. A. Marques, N. Lima, and G. R. Alves, "Diseño de instrumentos para la recolección de información durante la implementación del laboratorio remoto VISIR en Latinoamérica," in 1er. Congreso Latinoamericano de Ingeniería (CLADI 2017). Entre Ríos, Argentina, 13-15, Sept., 2017

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

Experiencia didáctica en la escuela secundaria con el laboratorio remoto VISIR

Manuel Blázquez, Alejandro Macho, Pablo Baizán, Félix García, Elio San Cristobal, Gabriel Diaz, Manuel Castro, Pedro Plaza

Departamento de Ingeniería Elecgrica, Electronica y de Control
Universidad Nacional de Educación a Distancia - UNED
Madrid, España

mblazquez@ieec.uned.es, amacho@ieec.uned.es, pbaizane@ieec.uned.es, fgarcialoro@ieec.uned.es,elio@ieec.uned.es,gdiaz@ieec.uned.es, mcastro@ieec.uned.es, pplaza@ieec.uned.es

***Abstract*— El laboratorio VISIR es una herramienta utilizada como laboratorio remoto en el ámbito de la educación superior. En esta comunicación se presentan las características de un curso llevado a cabo en el contexto de la educación secundaria en Tecnología para el aprendizaje de la Electricidad en el que se ha combinado VISIR y una metodología específicamente diseñada para la experiencia y que se basa en la taxonomía de Bloom-Anderson. El empleo de VISIR ha servido para reforzar con la práctica de medidas eléctricas, la adquisición de los conocimientos teóricos sobre los fundamentos de la Electricidad y la metodología para optimizar dicho aprendizaje hacia el desarrollo de destrezas y habilidades cognitivas.**

Se presentan igualmente los resultados de aprendizaje de los estudiantes participantes en la experiencia y se comparan estos resultados con la percepción que tienen los propios estudiantes sobre su aprendizaje.

Keywords*— *Laboratorio remoto, VISIR, Educación secundaria, Bloom-Anderson, medidas eléctricas, electricidad, proceso de enseñanza aprendizaje

I. INTRODUCCIÓN

VISIR es un laboratorio remoto enfocado al aprendizaje de la Electricidad y la Electrónica, bien conocido en el ámbito académico y de ingeniería [1, 3]. Su diseño se corresponde con una herramienta de aprendizaje para la práctica en cursos de pregrado y postgrado, pero no se tienen evidencias de que se haya como recurso para enseñar temas relacionados con la tecnología en la escuela secundaria. En este documento, se presenta un trabajo de investigación para mostrar el diseño, desarrollo, implementación y resultados de aprendizaje de una experiencia educativa con estudiantes de secundaria, cuyo propósito es la optimización del aprendizaje de magnitudes eléctricas y circuitos.

En realidad, para impulsar la optimización del aprendizaje de la electricidad en este tipo de estudiantes tan jóvenes, las herramientas tecnológicas no son suficientes. También se ha diseñado una metodología específica para llevar a cabo el proceso de enseñanza-aprendizaje. Para ello, la metodología se ha basado en las características de la taxonomía de Bloom-Anderson [2], con el fin de organizar las etapas de aprendizaje mediante la activación de un grupo de habilidades cognitivas de los alumnos de la Enseñanza Secundaria Obligatoria.

Así, el laboratorio remoto VISIR [6] ha sido el recurso utilizado para abordar el núcleo de las actividades, por medio del cual se han realizado medidas de magnitudes eléctricas en diversos componentes y circuitos.

Ambas propuestas han conformado la experiencia didáctica desde dos planos: el metodológico y el contextual. El planteamiento metodológico se ha aplicado a todos los alumnos ya que estamos convencidos de que el aprendizaje ha de estar centrado en el alumno y adaptado a las necesidad de cada uno de ellos. Pero, para medir las diferencias en el planteamiento contextual, es decir, en los recursos que se emplean para fomentar el aprendizaje de los contenidos de electricidad, se han creado dos grupos de trabajo entre los estudiantes participantes. Un primer grupo ha utilizado dispositivos de instrumentación comunes en cualquier laboratorio y se ha conformado como el grupo de referencia, mientras que un segundo grupo de estudiantes ha realizado las mediciones con el laboratorio remoto VISIR, estableciendo así el grupo de control.

La experiencia ha sido guiada por un documento de trabajo en el que se han incluido explicaciones y actividades didácticas, específicamente diseñadas utilizando una aproximación constructivista [11] que pretende destacar el desarrollo de habilidades cognitivas [2].

II. JUSTIFICACIÓN METODOLOGICA

En el mundo de la educación y sobre todo, en la educación en Ingeniería, los profesores estamos acostumbrados a enfocar el aprendizaje hacia la memorización y repetición de los procesos como herramienta didáctica fundamental. Así uno de los pilares del aprendizaje se basa en un planteamiento didáctico centrado en el profesor, el cual transmite sus conocimientos a los estudiantes, los cuales han de ejercitar la memoria y la repetición de ejercicios. La comprensión conceptual, queda por tanto, relegada a un segundo plano y va a depender en gran medida de las habilidades del propio estudiante. Este planteamiento se basa, por tanto, en aplicar una metodología puramente conductista [12] , en la que el profesor confía en que el estudiante sepa alcanzar el aprendizaje significativo por sí mismo. La forma de evaluar queda reducida, en la mayor parte de los casos, a la realización de exámenes y test, que miden de forma puntual el grado de adquisición del conocimiento por el estudiante. En cierto modo, se trata de evaluar una situación dinámica mediante una foto

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

final. La metodología propuesta pretende pues, evaluar el progreso de los estudiantes en cada una de las acciones y actividades que lleve a cabo y precisamente en este aspecto, hemos encontrado el planteamiento propuesto por Bloom-Anderson como el ideal para monitorizar estos progresos.

La anteriormente citada concepción conductista de la enseñanza se justifica a menudo, desde el ámbito docente, con la enorme cantidad de materia que un estudiante de Ingeniería tiene que asimilar y el poco tiempo disponible para conseguir sus objetivos de aprendizaje. Y aquí reside precisamente la razón de ser del trabajo de investigación que en este papel se presenta, bajo la hipótesis de que trabajar en el aprendizaje de los conceptos, magnitudes y procedimientos relacionados con la Electricidad y la Electrónica desde los cursos de educación secundaria, permitirá a los estudiantes asimilar los conocimientos de forma más sólida. A diferencia de los estudiantes universitarios, los alumnos de la etapa de secundaria están más abiertos al aprendizaje procedimental y comprensivo y son más reacios a aspectos como la memorización o el empleo de ecuaciones matemáticas. A la hora de diseñar la experiencia, este aspecto ha sido prioritario y hemos encontrado en la taxonomía de Bloom-Anderson características óptimas para nuestros propósitos.

2.1 La taxonomía de Bloom-Anderson

Bloom primeramente en 1948 y Anderson, en una revisión de 2001 [2], desarrollaron una clasificación de destrezas cognitivas, desde las más sencillas hasta las más complejas con el fin de establecer una norma que sirviera de guia en los procesos de evaluación del aprendizaje. Estas destrezas fueron agrupadas en dos niveles en las que se representan las capacidades mentales dirigidas hacia el empleo de la memoria o hacia el desarrollo creativo. Sendos niveles, definidos como habilidades de pensamiento o destrezas cognitivas de orden inferior y superior, se definen como *Low Order Thinking Skills* (LOTS) y *High Order Thinking Skills* (HOTS), respectivamente. Para ser más preciso, y de acuerdo con el esquema de la figura 1, las LOTS corresponden con las destrezas cognitivas relacionadas con la memorización, la comprensión de los elementos teóricos del conocimiento y su aplicación en la resolución de problemas. Por otro lado, las HOTS son aquellas destrezas que dotan al estudiante de capacidad de análisis de un problema, de evaluación de los contextos y de creación de nuevos escenarios.

Por lo tanto, uno de los objetivos del trabajo de investigación que aquí se presenta, tratará de evaluar el grado de consolidación de los LOTS y como consecuencia, su relación con el grado de alcance de los HOTS. Creemos que este planteamiento es correcto desde el punto de vista constructivista y ayudará a los estudiantes de educación secundaria a optimizar el aprendizaje de los fenómenos eléctricos y como consecuencia, mejorar sus destrezas cognitivas a la hora de aplicar una correcta estrategia de cálculo de los circuitos eléctricos.

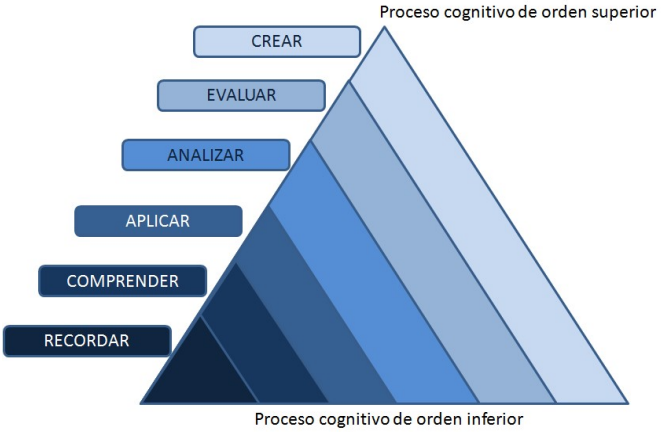


Fig. 1. Esquema de la taxonomía de Bloom-Anderson según los niveles cognitivos

2.2 El laboratorio remoto VISIR

Existen multitud de referencias a simuladores de circuitos eléctricos y laboratorios virtuales [10,13] , recursos que proliferaron en gran medida en la década de los 1990s. No obstante, con el cambio del milenio, muchos investigadores pensaron en la posibilidad de utilizar laboratorios que pudieran ser manejados de forma remota, empleado la web como medio de acceso. Este es el caso de VISIR (*Virtual Instrument Systems In Reality*), desarrollado en primera instancia por Ingvaar Gustavsson del Blekinge Institute of Technology en 2001 [8].

Aunque VISIR ya ha sido extensamente descrito en otras publicaciones como la llevada a cabo por Tawfik et al. en 2011 [1], se trata de un sistema que ofrece un entorno virtual al usuario a través de acceso web, mediante el cual se puede manipular las conexiones de un sistema de dispositivos eléctricos y electrónicos (plataforma PXI). La constitución de los dispositivos disponibles en el laboratorio para llevar a cabo las medidas se programa mediante la *Component List* (CL) o lista de componentes, que se cargará en el *Equipment Server Software* (ESS) o software de servidor de equipos. Los dispositivos en CL se combinan entonces con el *Measurement Server* o servidor de medidas para realizar las mediciones requeridas por el usuario.

Entre ambos extremos, el *User Interface* (Interfaz de usuario) y el *Server Equipment* (Equipamiento de servidor), se encuentran etapas intermedias que automatizan el acceso del usuario al sistema y la comunicación. Tal y como se observa en la figura 2, el proceso, desde el punto de vista del usuario, es sencillo, ya que se centra en acceder al sistema mediante sus credenciales y operar en el interfaz de usuario. El equipamiento dispone de un servidor Web y un gestor de base de datos que proporcionará la comunicación con el usuario a través del interfaz. Este interfaz tiene una operativa similar a la que se utilizaría en cualquier laboratorio presencial, empleando una breadboard sobre la que alojar los diferentes componentes eléctricos o electrónicos y procediendo a incorporar las diversas conexiones que configuran un circuito dado.

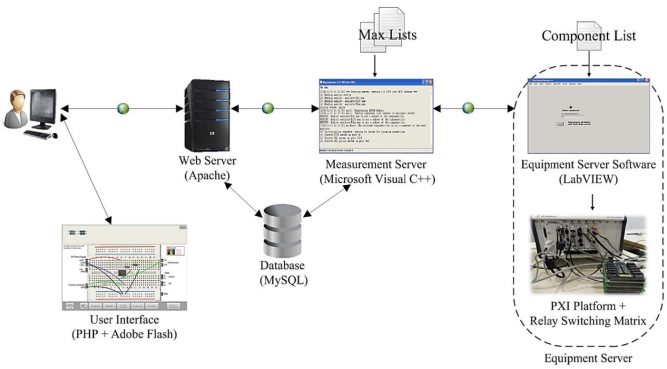


Fig. 2. Representación esquemática de los componentes de VISIR (Fuente: Tawfik et al. 2011)

Por otro lado, una de las utilidades de VISIR es la posibilidad de contar con instrumentos de medida de voltaje, intensidad eléctrica y resistencia eléctrica, con lo que el estudiante podrá realizar de forma autónoma las mediciones requeridas en cualquier protocolo de prácticas.

2.3 Diseño de la experiencia de aprendizaje

Para abordar los contenidos curriculares de la materia de Tecnología en la etapa de Educación Secundaria, se han fijado una serie de conceptos en el marco del diseño de la experiencia didáctica propuesta. Estos conceptos tienen carácter progresivo, y se enfocarán hacia el estudio de las magnitudes eléctricas, los resistores y otros componentes de los circuitos eléctricos, las configuraciones serie, paralelo y mixto de circuitos, la asociación de resistencias y el concepto de resistencia equivalente. La parte práctica contendrá los procedimientos de medida, la instrumentación y los dispositivos de medida y el concepto de error en la medida.

A fin de poder comparar, el impacto en el aprendizaje, la asimilación de contenidos y el desarrollo de destrezas relacionadas con la medida de magnitudes eléctricas, se ha dado a la totalidad del alumnado el mismo protocolo de prácticas, que consiste en un documento que contiene tanto explicaciones teóricas como propuestas de trabajo práctico y que ha sido diseñado siguiendo un diseño específico que atiende a las particularidades de la taxonomía de Bloom.

De forma adicional, se ha creado una plataforma educativa desarrollada en Moodle, con formato de MOOC, en la que se ha dispuesto la documentación de prácticas, así como otros materiales didácticos apropiados como videos de apoyo para el empleo del laboratorio remoto y para facilitar la comprensión del documento de prácticas. Los videos que se han incluido son de corta duración (entre 2 minutos y 8 minutos) y su objetivo es servir de guía a los alumnos en la secuenciación de actividades teóricas y prácticas. La plataforma educativa es accesible con cualquier navegador web mediante la URL http://62.204.201.27/moodle/.

Los alumnos participantes en este trabajo de investigación provienen de diversos grupos de los dos primeros cursos de Educación Secundaria. En total, han participado 147 estudiantes, 84 chicos y 63 chicas. La experiencia didáctica se ha llevado a cabo a lo largo de 6 sesiones de 55 minutos, distribuyendo las actividades tal y como se indica en la tabla 1.

TABLA I. TEMPORALIZACIÓN DE ACTIVIDADES SESIÓN A SESIÓN.

Actividad
Información general del proyecto Realización del cuestionario inicial
Visualización del video "*Que son VISIR y los laboratorios remotos?* " (solo para alumnos del laboratorio remoto) Visualización del video "*La estructura del curso de medidas eléctricas básicas* " mientras los alumnos proceden a la lectura del protocolo de prácticas.
Reconocimiento de la plataforma de medida de VISIR Visualización del video "*La metodología aplicada a las prácticas con VISIR* " Visualización del video "*Medida de resistencia eléctrica* (Nivel 1)" Realización de la práctica 1
Realización de la práctica 2 Visualización del video " *Medida de resistencias asociadas* (Nivel 2)" Realización de la práctica 3 y práctica 4
Revisión y finalización del protocolo de prácticas Entrega del protocolo de prácticas (curso 1º)
Visualización del video "*Estrategia útil para el cálculo de magnitudes eléctricas en circuitos mixtos*" Visualización del video "*Medidas de voltaje y corriente eléctrica con VISIR* (Nivel 3)" Realización de la práctica 5 y de la práctica 6 Revisión y finalización del protocolo de prácticas (2º curso) Entrega del protocolo de prácticas (2º curso)
Realización del cuestionario final Visualización del video "*Revisión de las prácticas y nuevas perspectivas de aprendizaje con VISIR*"

En la tabla anterior se observa que además de las actividades propias de la experiencia se han provisto de dos cuestionarios que los alumnos han tenido que completar al inicio y al final de la experiencia. Ambos cuestionarios contienen preguntas sobre sus conocimientos y expectativas respecto a las medidas eléctricas y al empleo de instrumentación. Los cuestionarios tienen la finalidad de medir la percepción subjetiva de los alumnos ante la experiencia didáctica.

Con el fin de poder contrastar los resultados de aprendizaje, se ha pensado en dividir a los grupos en dos grupos, un primer grupo de referencia y un segundo grupo de control. Ambos grupos han utilizado el mismo tiempo para las actividades y la misma documentación de prácticas. Los estudiantes del grupo de referencia, que se ha denominado Laboratorio presencial, han contado con aparatos de medida y dispositivos eléctricos reales y por tanto, han realizado las prácticas conectando manualmente diversas resistencias eléctricas en una breadboard y han medido con un multímetro. Por otro lado, el grupo de control, que se ha denominado Laboratorio Remoto, han utilizado el laboratorio remoto VISIR para realizar las conexiones en los circuitos y conectar la instrumentación. Así, la distribución de estudiantes según el laboratorio se ha reflejado en la tabla 2.

TABLA II. AGRUPAMIENTO DE LOS PARTICIPANTES DE ACUERDO AL GÉNERO Y AL TIPO DE LABORATORIO

		Laboratorio presencial	Remote Lab	Total
1º curso	Chicos	32	36	68
	Chicas	27	22	49
2º curso	Chicos	10	6	16
	Chicas	5	9	14
	TOTAL	74	73	147

III. PERCEPCIÓN SUBJETIVA DE LOS ESTUDIANTES SOBRE LA EXPERIENCIA

Con el fin de conocer la percepción de los estudiantes frente a su propio aprendizaje, se han realizado dos cuestionarios, que se realizarán por los estudiantes respectivamente antes (pre-test) y después (post-test) de la realización de la experiencia. Ambos cuestionarios exponen preguntas con el fin de recabar información sobre las expectativas y motivaciones, los contenidos y la metodología y el tipo de laboratorio que se utiliza en la experiencia de medidas eléctricas. Cada uno de los 147 alumnos participantes en la experiencia ha respondido a 25 preguntas, que se han distribuido en 5 bloques.

2.4 Resultados de los datos más significativos de los cuestionarios

En el primer apartado, se ha realizado la pregunta " *Would you like to work in your professional future in a position related to Technology?",* (en castellano, ¿Te gustaría cuyas respuestas nos parece muy significativas). Los estudiantes podían responder "Yes" que se ha valorado con un 2, "Not clear yet" (No lo tengo claro todavía, en castellano) que se ha valorado con un 1 o "No" cuyo valor ha sido asignado a 0.

En la siguiente figura se puede ver la distribución de las respuestas. Tanto las respuestas dadas en el cuestionario inicial como en el final han coincidido. En ellas, se observa una indefinición generalizada ante su futuro, debido a su corta edad, pero también se observa como las chicas les atrae menos un futuro profesional relacionado con la tecnología. El porcentaje de rechazo de las chicas (35%) es similar al porcentaje de atracción por la Tecnología de los chicos (33%)

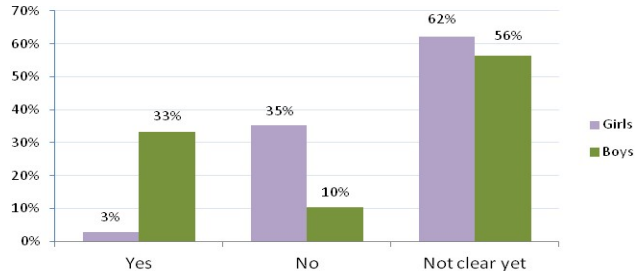


Fig. 3. Fig. 1. Answers to: "Would you like to work in your professional future in a position related to Technology?"

En el segundo bloque, los estudiantes son preguntados sobre sus conocimientos de electricidad, específicamente sobre las magnitudes eléctricas, sobre si son capaces de interpretar el esquema de un circuito eléctrico y de reconocer los componentes eléctricos más habituales, si bien la más importante se dirige a la valoración que hacen los estudiantes sobre su destreza en el uso de un multímetro, resultados que se muestran en la tabla 3 mediante un valor en una escala de 10.

TABLA III. PERCEPCIÓN DE LOS ESTUDIANTES SOBRE LA ADQUISICIÓN DE NUEVAS DESTREZAS CON EL EMPLEO DE UN MULTIMERO

	Género		Laboratorio	
	Chicos	Chicas	Remoto	Presencial
Media del test inicial	4.73	4.29	4.68	4.77
Media del test final	7.94	7.64	8.17	7.71
Factor de mejora	3.21	3.35	3.49	2.94

En la anterior tabla 3 se observa como los alumnos, consideraban antes de hacer las prácticas que sus conocimientos sobre el empleo de un multímetro eran insuficientes. Tras la realización de la experiencia, todos ellos reconocen haber mejorado de forma significativa en esta destreza. La percepción de mejora es mayor en chicas que en chicos y también es mayor en aquellos alumnos que han utilizado el laboratorio remoto.

En el tercer bloque de preguntas, se preguntaba sobre sus expectativas y motivación ante nuevos conocimientos. La pregunta principal está relacionada sobre si ellos son conscientes de adquirir nuevas destrezas con la realización de las prácticas. Las respuestas antes y después de haberlas realizado son significativas y diferentes dependiendo del agrupamiento, tal y como se observa en los datos en una escala de 10 en la tabla 4. Se puede observar que mientras los chicos reconocen haber mejorado en sus capacidades, las chicas indican que esperaban haber obtenido más conocimientos y destrezas tras la realización de la experiencia.

TABLA IV. VALORACIÓN DE LOS ALUMNOS SOBRE LA UTILIDAD DEL CURSO EN LA ADQUISICIÓN DE DESTREZAS Y CONOCIMIENTOS

	Género		Laboratorio	
	Chicas	Chicas	Remoto	Presencial
Initial test avg.	7.71	8.20	7.95	7.82
Final test avg.	8.20	7.84	8.04	7.53
Mean difference	0.49	-0.37	0.09	-0.29

Igualmente ocurre si agrupamos los datos en relación al tipo de laboratorio utilizado. Los estudiantes que han practicado con el laboratorio remoto VISIR indican que esperaban adquirir un determinado nivel de adquisición de destrezas y tras la realización de la experiencia, han corroborado ese dato. Por otro lado, los alumnos que han utilizado instrumentación del laboratorio presencial, reconocen haber adquirido un nivel ligeramente inferior del que esperaban.

El cuarto bloque de preguntas, las preguntas se dirigen hacia la más importante: "Creo que después de hacer las prácticas, habré aprendido de forma permanente como se hacen las medidas eléctricas" en el cuestionario inicial y "Creo que después de hacer las prácticas, he aprendido de forma permanente como se hacen las medidas eléctricas". En cierto

modo, la medida de estas respuestas dará una idea del convencimiento del propio estudiante a su aprendizaje.

TABLA V. VALORACIÓN DE LOS ALUMNOS SOBRE SU APRENDIZAJE SIGNIFICATIVO Y PERMANENTE

	Gender		Laboratory	
	Boys	Girls	Remote	Actual
Initial test avg	7.26	7.23	6.90	7.40
Final test avg	7.31	7.01	7.12	7.35
Mean difference	0.05	-0.2	0.22	-0.05

Al analizar las respuestas expuestas en la tabla 5, se observa que tanto chicos como chicas tienen a priori confianza en la experiencia didáctica para su consolidar su aprendizaje. Esta confianza se mantiene en los chicos tras realizar la experiencia, pero se reduce en el caso de las chicas. En relación al agrupamiento según laboratorios, se observa que los estudiantes que han utilizado VISIR tienen confianza en haber consolidado sus conocimientos, mientras que en los alumnos que han utilizado el Laboratorio presencial se puede interpretar que se han cumplido sus expectativas.

Finalmente, los autores estábamos muy interesados en la percepción que tienen los estudiantes sobre el formato del laboratorio y para ello, las preguntas finales (Preguntas 21 a 25) han sido:

- Q21. Creo que el diseño del laboratorio es atractivo
- Q22. Creo que el diseño del laboratorio es intuitivo y fácil de manejar
- Q23. Creo que el empleo del laboratorio me ha ayudado a asimilar más fácilmente como funciona la electricidad
- Q24. Considero importante que el laboratorio se adecúe a mis necesidades.
- Q25. Creo que después de utilizar el laboratorio, mis conocimientos y comprensión de los componentes y circuitos eléctricos han mejorado.

La respuesta de los alumnos se ha recogido en una tabla en la que se muestran la proporción de alumnos que han contestado con valoración negativa (en rojo) y que han contestado positivamente (en verde). En general se observa mayorías de respuestas positivas, si bien hay que destacar la cantidad de alumnos que piensan que el laboratorio remoto VISIR no es fácil de usar ni intuitivo. Por otro lado, un tercio de los alumnos que han empleado el laboratorio presencial piensa que no se ha adaptado a sus necesidades.



Fig. 4. Análisis de las preguntas relacionadas con el impacto de los laboratorios en la mejora del aprendizaje de los alumnos.

IV. RESULTADOS DE APRENDIZAJE

El trabajo de investigación que aquí se presenta tiene dos claros objetivos educativos. El primero se enfoca hacia la evaluación del impacto que la realización de las prácticas ha tenido en la adquisición de conocimientos teóricos con el fin de valorar la idoneidad del laboratorio remoto VISIR como recurso de aprendizaje. El segundo consistirá en la validación de la hipótesis de que el grado de consolidación de LOTS (*Low order thinking skills*) influye en la adquisición de HOTS (*High order thinking skills*).

De forma general, queremos exponer en primer lugar los resultados obtenidos por los estudiantes en la realización de las pruebas. Estas calificaciones objetivas, divididas por curso, se han incluido en la tabla 6. A la vista de estos valores, las calificaciones obtenidas en el Nivel 1 son bastante mediocres y muy similares entre alumnos del *Laboratorio presencial* y de *VISIR remote lab*. En este caso, se producen dos circunstancias que explican estas bajas calificaciones. Por un lado, los alumnos no han estudiado nunca temas relacionados con Electricidad y el empleo de reglas matemáticas les resulta complicado. Por otro, también es la primera vez que utilizan instrumentación. Ambos factores aumentan su incidencia con el poco tiempo de duración de las actividades.

TABLA VI. NOTAS MEDIAS DE LOS ESTUDIANTES DEPENDIENDO DEL TIPO DE LABORATORIO USADO Y DEL GÉNERO

	Tipo de laboratorio		Género	
	Presencial	VISIR	Chicas	Chicos
Students	59	58	49	68
Media Nivel 1	4.71	4.66	5.43	4.17
Media Nivel 2	5.86	4.69	6.14	4.56
Media Nivel 3	4.33	5.43	6.26	3.41

Estas diferencias se amplían cuando se trata de comparar los resultados de las actividades del Nivel 2, mejorando en el caso del *Laboratorio presencial*. Es posible que el empleo de VISIR, requiera un cierto aprendizaje que los alumnos de corta edad no han realizado. Es precisamente en el Nivel 3, el más complejo, en el que los estudiantes de VISIR obtienen mejores calificaciones de forma significativa.

En cuanto al análisis de los datos relativos al género, es muy destacable la diferencia en las calificaciones entre chicos y chicas. Las diferencias son mayores a medida que aumenta la dificultad en el manejo del laboratorio.

4.1 Impacto de la realización de prácticas en el aprendizaje

Los estudiantes han utilizado el protocolo de prácticas como documento guía en el que han contestado a las actividades propuestas. Algunas de ellas han sido de carácter teórico y en otras, tenían que escribir los resultados de sus mediciones como parte de la actividad práctica. En las siguientes figuras hemos representado una nube de puntos en las que el eje X corresponde con la valoración obtenida en las actividades manejo de instrumentación y medidas y en el eje Y las valoraciones en las actividades teóricas.

Como se puede observar en la serie de figuras 6 a 8, los resultados son mucho mejores en las actividades del Nivel 2, a pesar de ser un nivel más complejo. Este fenómeno entendemos que tiene mucho que ver con la familiaridad en el empleo del laboratorio en el Nivel 2 y en la dificultad de dar los primeros pasos en el Nivel 1. En un examen más exhaustivo de las valoraciones de los alumnos en función del tipo de laboratorio utilizado, se observa una mayor concentración de punto en el área definida como "*High performance área - High relation practice-learning*" (Área de alto rendimiento - Alta relación práctica-aprendizaje) en los alumnos que han utilizado VISIR. Por otro lado, nos ha parecido interesante realizar una comparativa entre estudiantes según el sexo. Este análisis ha sido motivado al observar las respuestas a las pregunta de los cuestionarios por parte de la chicas, que nos ha parecido que ofrecían una percepción de su aprendizaje inferior a la de los chicos.En las siguientes figuras 9 y 10, se ha procedido a representar las nubes de puntos por niveles. Así, la figura 9 corresponde con las valoraciones de medición del aprendizaje teórico-práctico en las chicas (a la izquierda de la gráfica) y los chicos (a la derecha de la gráfica) para las actividades del nivel 1. En la figura 10 se han representado las valoraciones para el nivel 2 de actividades.

Tal y como se puede observar, se da una situación paradójica, ya que en ambos niveles L1 y L2, existen más puntos localizados en las áreas de "*High performance*" (Alto rendimiento) y "*Good practices but low learning*" (Buenas prácticas, pero bajo nivel de aprendizaje) en el caso de las chicas, es decir, las calificaciones obtenidas por las chicas se confirman como mejores que las de los chicos. Esta situación contrasta con la opinión más modesta que tienen las chicas de su propio aprendizaje que los chicos.

4.2 Estudio de la relación LOTS-HOTS

En un segundo tipo de análisis, las actividades han sido identificadas según la incidencia que tenga en las destrezas cognitivas. Así, se han formado dos grupos de actividades, aquellas que influyen en el desarrollo de Low Order Thinking Skills (LOTS) y aquellas que permiten a los alumnos desarrollar sus High Order Thinking Skills (HOTS). Nuestra hipótesis planteada indica que para poder desarrollar destrezas HOTS es fundamental que se hayan trabajado suficientemente las destrezas inferiores LOTS. Así hemos medido de forma individual el rendimiento de los estudiantes en ambos tipos de actividades y hemos tenido en cuenta el factor de la edad del alumno, ya que muy posiblemente sea uno de los factores más importantes en el desarrollo cognitivo, sobre todo a edad adolescente. Así, en la figura 11, se ha representado una gráfica en la que se han expuesto las calificaciones obtenidas en ambos tipos de actividades, LOTS y HOTS, en alumnos de primer curso (12 años de edad). Las calificaciones de los alumnos han sido agrupadas en rangos indicados en el eje X. El eje Y representa el porcentaje de estudiantes cuya calificación se encuentra en cada rango. Así se puede observar que la mayoría de los alumnos concentran sus calificaciones en un rango entre 5 y 8 puntos sobre 10 en el caso de las destrezas LOTS, mientas que en el caso de las HOTS, la mayoría de ellos no ha pasado de una calificación de 5. En cierto modo, esto corrobora en parte la hipótesis ya que podemos identificar problemas a la hora de realizar actividades que exijan análisis y creación de situaciones.

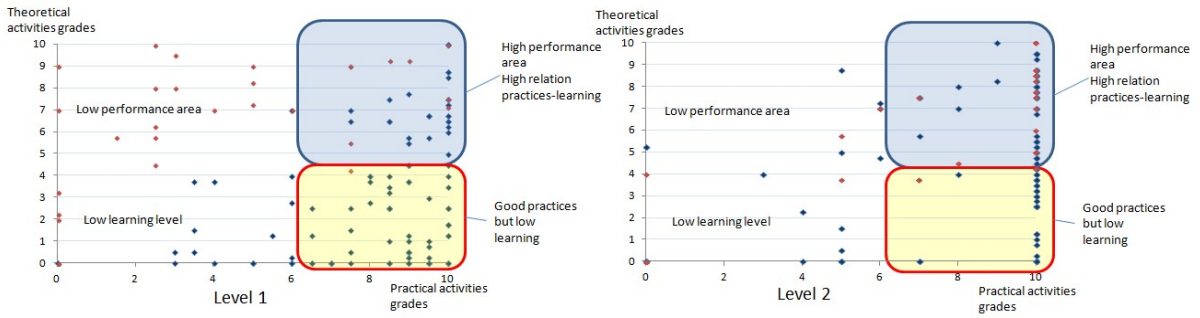


Fig. 5. Relación de las notas de las actividades prácticas y teóricas (Todos los estudiantes)

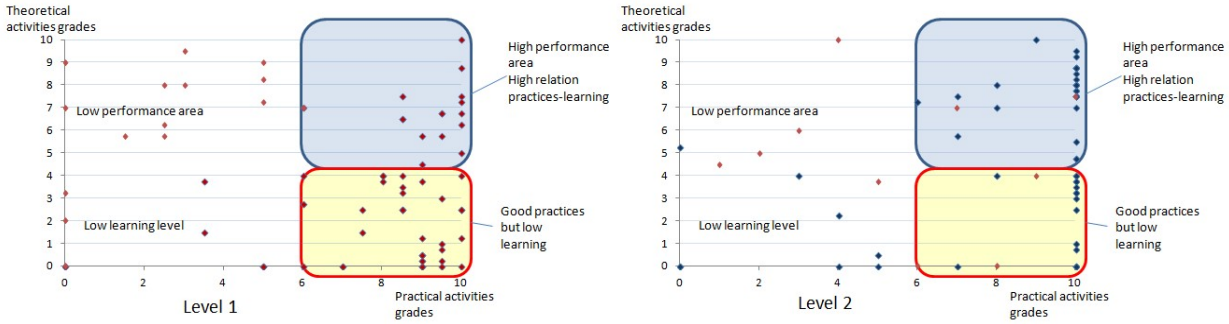


Fig. 6. Relación de las notas de las actividades prácticas y teóricas (Alumnos de laboratorio presencial)

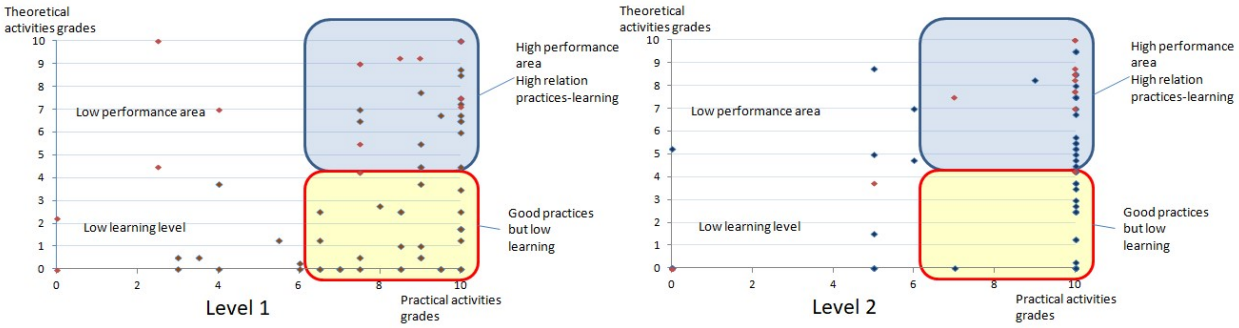


Fig. 7. Relación de las notas de las actividades prácticas y teóricas (Alumnos de VISIR)

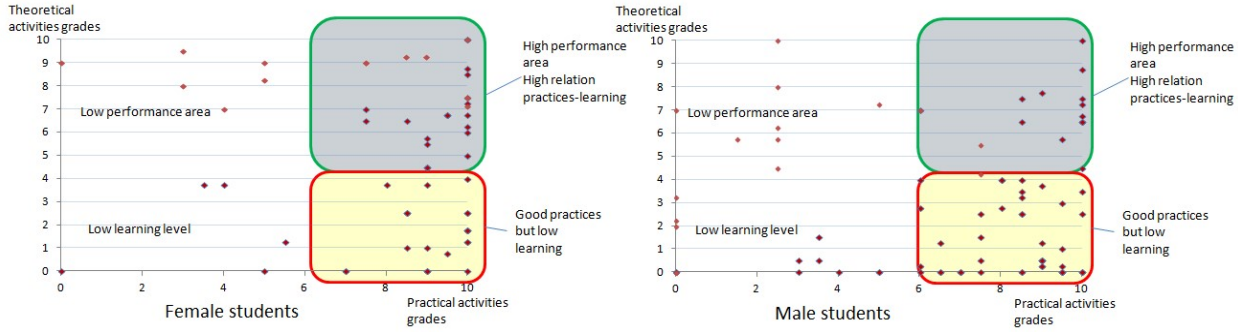


Fig. 8. Comparación de las notas de las actividades del Nivel 1 según el género

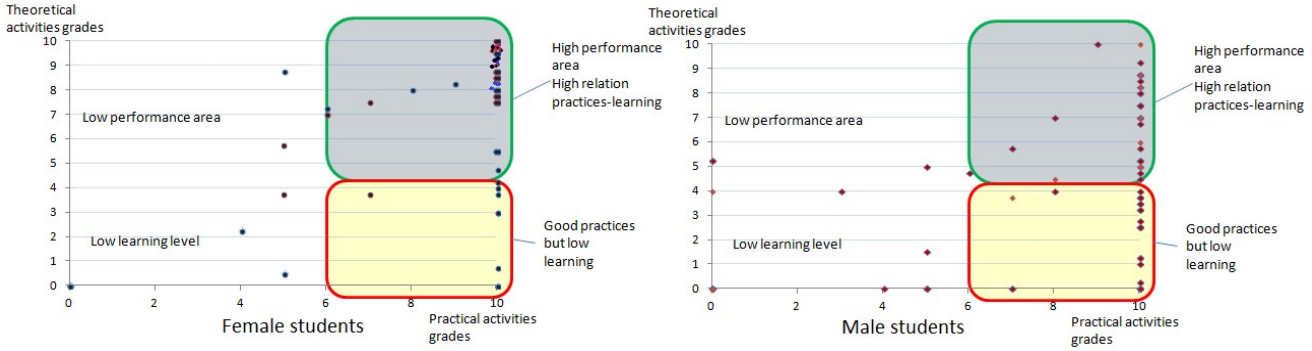


Fig. 9. Comparación de las notas de las actividades del Nivel 2 según el género

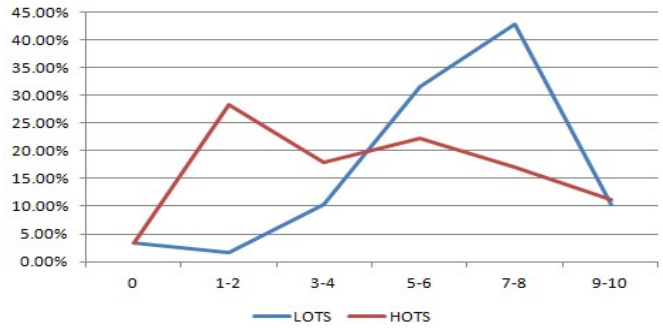


Fig. 10. Distribución de las notas de acuerdo con el tipo de actividad cognitiva (LOTS/HOTS) en alumnos de 1º curso



Fig. 11. Distribución de las notas de acuerdo con el tipo de actividad cognitiva (LOTS/HOTS) en alumnos de 2º curso

Para complementar estos datos, es importante observar que ha ocurrido con los estudiantes de 2º año. En la figura 12 se ha representado una gráfica con el mismo formato que en la figura 11, de forma que se puedan comparar. En este caso, la curva que representa las destrezas HOTS, es más parecida a la que representa los LOTS. Un parámetro que es conveniente analizar, ya que se trata de dos variables con un elevado grado de dependencia, es el factor de correlación (R). Utilizando los valores de la covarianza y de las varianzas particulares para cada una de las distribuciones de frecuencia, se han obtenido los valores de R_1= 0,49 y R_2 = 0.86.

En la siguiente figura 13 se ha representado de forma simultánea sendas nubes de puntos para los estudiantes de primer curso y de segundo curso, observándose claramente porqué el factor de correlación en los alumnos de 2º curso es superior que en alumnos de primer curso. Las coordenadas de cada punto en el primer curso más concentradas en el centro del gráfico lo que reduce la relación mutua entre ambas variables, mientras que en el caso de 2º curso, los puntos se concentran a lo largo de una recta pendiente. Esto identifica claramente una relación mutua fuerte entre ambas variables LOTS y HOTS, con lo que en este caso sí podemos afirmar la validez de nuestra hipótesis.

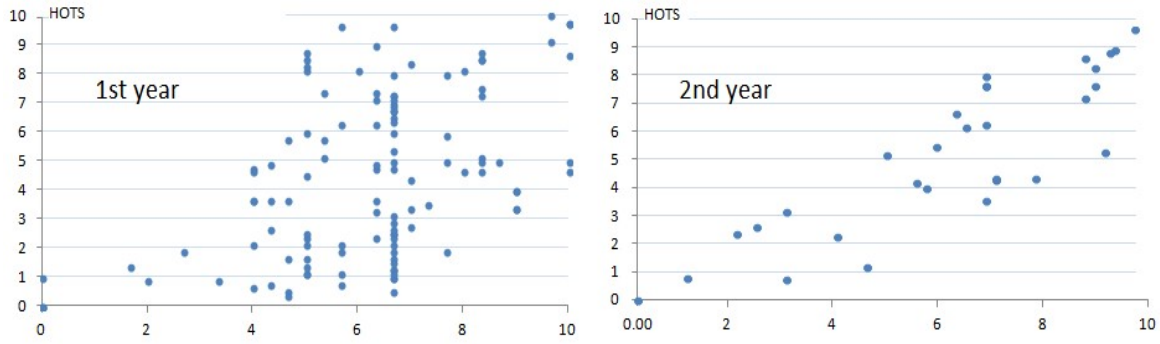


Fig. 12. Relación mutua (correlación) entre las variables LOTS y HOTS en 1º y 2º cursos

V. CONCLUSIONES

Al comienzo del trabajo de investigación que se presenta, se propusieron varios objetivos, todos ellos enmarcados en el contexto de una hipótesis. La hipótesis se ha formulado en el contexto del empleo de recursos poco habituales en la enseñanza de la Electricidad. Así, dada la disponibilidad del laboratorio remoto VISIR y de su adaptabilidad a diversos niveles educativos nos permitió pensar en la posibilidad de incluir este recurso como medio óptimo de aprendizaje. Este es uno de los objetivos marcados en la hipótesis. En segundo lugar, se pensó en que el laboratorio remoto, empleado ampliamente en el contexto de la educación en Ingeniería, se podría complementar con una metodología de nueva creación, aunque basada en las indicaciones dadas en la taxonomía de Bloom-Anderson. Así a partir de estos dos recursos, técnico y metodológico respectivamente, se ha formado a un grupo de estudiantes de educación secundaria.

Los estudiantes, cuyas edades están comprendidas entre los 12 y los 14 años de edad, han de aprender en el contexto del currículo de Educación Secundaria los temas relacionados con la Electricidad, los fenómenos y magnitudes eléctricas y los circuitos eléctricos. Hasta la fecha, la mayor parte del profesorado enseña siguiendo un modelo tradicional conductista y los autores pensamos si sería adecuado e si se podría llegar a optimizar el aprendizaje en estos estudiantes.

Así, se reunió a un conjunto de 147 alumnos y estos fueron divididos en dos grupos, un grupo de referencia que emplearía la instrumentación habitual en un laboratorio de electrónica y un grupo de control que emplearía el laboratorio remoto VISIR para la realización de circuitos y medidas en sus componentes eléctricos.

La experiencia didáctica derivada de este planteamiento ha sido satisfactoria, ya que se han obtenido unas conclusiones que permiten continuar ahondando en esta investigación.

Como primera conclusión se ha de indicar que el empleo del laboratorio VISIR tiene un impacto en el aprendizaje de los estudiantes muy similar al empleo de un laboratorio real para estudiantes de primer curso de educación secundaria (12 años de edad), aunque hemos podido verificar que dicho impacto es significativamente superior para estudiantes mayores (14 años de edad).

Como segunda conclusión se ha observado que las chicas han podido sacar mayor partido al laboratorio y a la metodología que los chicos, habiendo obtenido calificaciones superiores que los chicos de hasta un 20% de diferencia. A pesar de todo y de forma paradójica, la impresión y percepción que tienen las chicas sobre su propio aprendizaje es inferior a la que tienen los chicos, los cuales creen haber aprendido más de lo que en realidad han hecho. Es muy posible que estas conclusiones puedan justificarse desde el plano de la Psicología, pero en nuestro caso, tan solo hemos podido constatar este hecho significativo.

La edad de los alumnos también es un factor importante a la hora de asumir la metodología presentada y hemos podido verificar que la relación entre la consolidación de los Low Order Thinking Skills relacionados con la actividad memorística y con la comprensión y el desarrollo de los High Order Thinking Skills, mediante las cuales se accede al empleo de herramientas cognitivas analíticas y de pensamiento reflexivo y creativo, tiene una fuerte correlación cuando se trata de alumnos de 14 años, mientras que dicha correlación es más débil en alumnos de primer curso de educación secundaria, de 12 años de edad.

Estas conclusiones, junto con las cifras y estadísticas generadas en el trabajo de investigación no son concluyentes ni definitivas, aunque ciertamente significativas y los autores nos comprometemos a seguir estudiando y mejorando los recursos utilizados en dos vías. Una primera vía la exploraremos en el sentido de perfeccionar la metodología con el fin de conseguir un proceso que optimice el aprendizaje de la Electricidad de forma general sin importar la edad de los alumnos. Una segunda vía, consistirá en la creación de nuevas adaptaciones en el laboratorio remoto VISIR para el aprendizaje de circuitos electrónicos.

RECONOCIMIENTOS

Los autores reconocen el apoyo de la Escuela de Doctorado de la UNED, Poyecto eMadrid (Investigación y Desarrollo de Tecnologías Educativas en la Comunidad de Madrid) - S2013/ICE-2715, VISIR+ Proyecto (Educational Modules for Electric and Electronic Circuits Theory and Practice following an Enquiry-based Teaching and Learning Methodology supported by VISIR) Erasmus+ Capacity Building in Higher Education 2015 nº 561735-EPP-1-2015-1-PT-EPPKA2-CBHE-JP y proyecto PILAR (Platform Integration of Laboratories based on the Architecture of visiR), Socio estratégico de Erasmus+ nº 2016-1-ES01-KA203-025327.

REFERENCES

[1] Tawfik, Mohamed et al (2011) "VISIR Deployment in Undergraduate Engineering Practices. Global Online Laboratory". Consortium Remote Laboratories Workshop (GOLC), 2011. 978-1-4577-1944-8. GOLC Workshop in the 41st ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference (FIE 2011).

[2] Anderson, L.(2001) "Taxonomy of educational objectives," in Encyclopedia of Educational Theory and Philosophy Anonymous Sage Publications, 01, pp. 789-791

[3] García-Zubía, Javier et al (2010) "Easily Integrable platform for the deployment of a remote laboratory for microcontrollers". EDUCON 2010 – Annual Global Engineering Education Conference - The Future of Global Learning in Engineering Education. IEEE Education Society. EDUCON 2010 Conference Book. ISBN: 978-84-96737-70-9

[4] Chen, Xuemin; Zhang, Yongpeng; Kehinde, Lawrence and Olowokere, David (2010) "Developing virtual and remote undergraduate laboratory

for engineering students", 40th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference Proceedings. January 13th, 2010, Arlington, VA

[5] Angulo, I. et al.. (2010) "El proyecto VISIR en la universidad de Deusto: laboratorio remoto para electrónica básica". Conference proceedings TAEE 2010 - ISBN: 978-84-96737-69-3

[6] Gustavsson, Ingvar (2001) "Laboratory experiments in distance learning". Proceedings of the ICEE 2001 Conference August 6 - 10, 2001. Oslo/Bergen, Norway. Available at: http://www.ineer.org/. Last visit: February 27th, 2017.

[7] Gustavsson, I.and e. al, (2007) "The VISIR Project - An Open Source Software Initiative for Distributed Online Laboratories," in Remote Engineering & Virtual Instrumentation (REV '07), June 2007

[8] Deniz, Dervis Z., Bulancak, Atilla and Özcan, Gökhan (2003) "A novel approach to remote laboratories". 32nd ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference Proceedings. November 6 - 9, 2002, Boston, MA

[9] Pastor Vargas, Rafael. (2006) "Especificación formal de laboratorios virtuales y remotos: Aplicación a la Ingeniería de Control". Doctoral Thesis presente at Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática de la Universidad Nacional de Educación a Distancia. UNED, 2006

[10] Bragós, Ramon; Garofano, Francesc; Guasch, Aleix; Sánchez-Terrones, Benjamin (2010) A Remote Laboratory to Promote the Interaction between University and Secondary Education". EDUCON 2010 – Annual Global Engineering Education Conference - The Future of Global Learning in Engineering Education. IEEE Education Society. EDUCON 2010 Conference Book. ISBN: 978-84-96737-70-9 - Depósito legal: M-11728- 2010

[11] Bruner, J. (1966). Studies in cognitive growth: A collaboration at the Center for Cognitive Studies. New York: Wiley & Sons.

[12] Blázquez et al (2017) "Diseño de experiencias didácticas constructivistas con laboratorios remotos en el contexto de la Educación Tecnológica en la etapa de Secundaria mediante la taxonomía de Bloom-Anderson". Trabajo de Investigación para el Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Control, Telemática y Química aplicada a la Ingeniería. E. T. S. Ingenieros Industriales.

[13] Dormido, S. y Esquembre, F. (2003) "*The quadruple-tank process: An interactive tool for control education*", Prco. ECC'03, 2003, Cambridge.

Experience in developing personal learning environments for the subject systems of data acquisition.

C. Rus-Casas[1], Juan D. Aguilar-Peña[1], G. Jiménez-Castillo[1], M. A. Peña-Hita[2], F. Muñoz-Rodríguez[1]
[1]Departamento Ingeniería Electrónica y Automática
[2]Departamento de Pedagogía
Universidad de Jaén
Jaén (España)
Email: crus@ujaen.es

***Abstract*—The teaching methodology at the engineering university degrees is basically practical. It is set in a context in which students are involved in their teaching process building up their own learning. This article shows evidence of the work made in the subject "Data Acquisition Systems" (DAS) in which the teacher fosters a personal learning environment (PLE) within this area in order to enrich the students' training process.**

Keywords*—Data Acquisition Systems (SAD); sensors; personal learning environment (PLE); social networks.*

I. INTRODUCTION

Innovation at teaching favors the evolution, change and also the improvement of the Higher Education and even more; it guarantees a qualified university teaching. It is very common to find innovation projects aiming to the promotion of these changes among universities.

These innovation projects foster the creation of teachers' groups within which innovative activities have been carried out facing the current Education Paradigm which we suffer. The different proposals are based on technical and methodological aspects of the teaching practice. Within that innovation frame, emerge the use of didactic methodologies, the development and evaluation of competences and finally, the design of activities which improve the learning results. That is the reason why these projects should ideally assess some criteria such as: the learners and teachers' satisfaction, the implement of participatory methodologies, and also the improvement of the performance rate [1], [2].

Despite, the little recognition towards teachers who get involved in innovation practices could become a very negative aspect and make teachers feel demotivated. For instance, if we compare the recognition by working on innovation and by working on research, it is clearly seen that the second one is given much more accreditation. Nevertheless, many teachers care about quality and feel encouraged to improve step by step their job. It enhances them to propose innovation projects to cover all the students' learning needs and to provide them with the required tools and sources so that they can acquire the key competencies such as "learning to learn".

Through ages, the human being has been surrounded by an environment that makes him build up his own knowledge in an innate way; that is to say, without realizing that [3]. However, the first time when this idea of " Personal Learning Environment" appeared, was at the annual conference JISC-CETIF in 2004 [4]. Since its beginning, the PLE's were took as an interesting part within e-learning, a learning far for master classes or lectures and focused, at the same time, on the variety of tools that internet offers to us [5]. Step by step, it was being spread and today is one of the most controversial topics in the educational technology environment [6]. Furthermore, those new concepts have been classified as an emerging educational tool [7].

In the educational technology field, a PLE is understood as "an ensemble of tools, sources of information, connections and activities which each individual uses in a regularly to learn [3], [6]. Initially, different thoughts in relation to the concept were born [8]. One theory stays that a PLE is that technological tool which main aim is to develop the best e-learning [9]. A second theory defines the PLES's as a pedagogical idea about how to learn using the technology [6]. Nevertheless, both thoughts have a common point which is the techno-pedagogical idea within the concept of PLE [3]. Therefore, implementing PLE could offer us a wide variety of work tools, services, and contents which are accessible to students in the classroom and out of the classroom too. PLE could also be very useful for a knowledge based society since it entails a constant learning throughout one's life [10]. By contrast, it is not quite common to hear the term PLE within the engineering teaching area. Despite, some authors include the design of a PLE in their subjects' guide in order to foster an active learning among students [3].

Nowadays, all the tools or sources that we find on the 2.0 web allow us to better organized all the contents, to distribute them and to adapt the learning process itself to each user's needs. In this way, a learning focused on the students is being favored. In this article, the personal learning environments are those in which each individual discriminate what resources uses in order to learn, create or share.

For the construction of a PLE each one will may decide a via to access to the services by which a personalised learning

process is guaranteed. At the same time, the contents could be organised through different types of content management. This way, they can complete their knowledge with other resources such as web links, pictures, videos, audios, documents and PowerPoint presentations. Each of the resources should be lodged in specific places for them.

This project would go further with the authors' experience within that area [11] and shows the experience carried out in the subject so-called "Data Acquisition Systems" in which the construction of a PLE at this field by students is highly taken into account for their evaluation in order to enrich students' training process.

II. TOOLS FOR THE DESIGN OF A ENGINEERING STUDENT'S PLE

In the engineering field there are some experiences in the classroom with PLE as in the case of activities which are developed through the "Electronic Communications" subject in which the learners value successfully the work done and they also described the methods which were applied as useful for their learning process [12]. Another experience with good results is the case of "Microprocessors" subject. In that occasion, it is used the DIY (Do It Yourself) technique in order to create those PLE's. In that particular case, the number of passing students increased a 20% if we compare it to previous cased in which the same technique had been put into place [10].

As previously mentioned on the personal learning environments definition, the technological tools are used to support the overall learning strategies. That's why knowing the use technology students give to the development of a PLE could be interesting, as they vary between countries [13]. The 2.0 web tools offer a huge potential for college students faced towards the development of PLE´s [14]. At the 2.0 web, the users take an active role, in which not only they read, but also deliberate, clarify, evaluate and share [15]. Thanks to these paradigm changes amongst others, information grows rapidly inside internet. Forecastings predict a double increase every 72 hours of this information, which would be quickly left obsolete, collapsing many web contents [16]. In this context a new concept emerges: content cure. The content curator role is defined by Guallar & Leiva [17] as:

"System carried out by a content curator either for an organisation or individually, consisting of a search, selection, characterization and continued diffusion of the most relevant content from many web information sources about a specific theme (or themes) and area (or areas), focused on a determined audience, either in the web (mayor trend) whereas in other different contexts, such as organisations, offering an added value enrolling audience and users together."

Guallar & Leiva also propose the 4S's content curation method, going through the search, selection, sense making (characterization) and share (diffusion of selected and characterised information) [18].



Fig. 1. Scheme of the 4S method and the tools used.

Fig. 1, in order to accomplish the curation process which best adapts to the users needs correctly. This methodology can help engineering students to acquire cross-sectional capacities, as defined in the memorial of their degree title [19], specially the following:

- CT2 - "Information management capacity, use and application of technical specifications and necessary legislation for the engineer praxis"
- CT6 - "Oral and written transmission capacity of information adapted to the audience"

There is an extensive bibliography available referring to the tools used in the development of PLEs [20], [21]. Among those, concretely in the subject of "Data Acquisition Systems", the chosen ones are shown in figure 1.

III. AIMS AND METHODOLOGY

While the academic years 2016-2017 and 2017-2018, an innovation project is being carried out. That project aims to develop a Personal Learning Environment in several subjects of the Electronic Engineering Degree. The experience shown within this essay has been carried throughout the already mentioned Data Acquisition Systems subject, which belongs to the elective classes of the 4th year of the degree. Chart II includes the syllabus of the degree and it shows that the Data Acquisition Subject is a cross-curricular subject to the possible specialties of the degree.

One of the first points to cover within this subject from the very beginning is a deep review of the different data acquisition system set ups. Chart II includes an outline with the elements which form a data acquisition system. That kind of systems enable the monitoring of any sign (from our environment or part of an industrial process) in a suitable way and also the automation of the mentioned measure process.

TABLE I INDUSTRIAL ELECTRONIC ENGINEERING DEGREEE SYLLABUS.

Electronic Engineering Degree *240 Credits*			
First & second years *60 Credits/basic training and compulsory training*			
3 year	*60 Credits of compulsory training courses*	Introduction to photovoltaic systems Industrial informatics Basis of environmental technology Analog electronic	Digital Electronic Analog systems **Electronic instrumentation** Control Engineering Power electronic Advance Automatic
4 year	*30 Credits of compulsory training courses*	PC control Final Degree Project Projects Advanced Electrical Engineering	
	30 Credits of effective training	**Electronic system Specialty** **Automatic systems Specialty** **Photovoltaic systems Specialty**	
		Oferta común no asociada a mención	**Data Acquisition Systems** Chapter 1 Introduction to Data Acquisitions Systems Chapter 2 Systems & Signs *2.1. Kind of signs* *2.2. Operations Signs* *2.3. Types of systems* Chapter 3 Measure and conditioning of the entrance signs. **3.1. Classifying of sensors** **3.2. Characterization and selection sensors criteria.** *3.3. Design of measure systems* Chapter 4: Interconnection of the measurement system. Interfaces. Chapter 5: Measure systems Noise

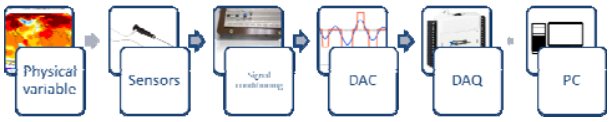


Fig. 2. Architecture of a data acquisition system.

The project is set in the gauges field since in every industrial process it is essential to know the evolution of the most important variables within that process.

TABLE II FICHA PROPUESTA EN LA ASIGNATURA SAD DE UN SENSOR DE TEMPERATURA TIPO TERMISTOR.

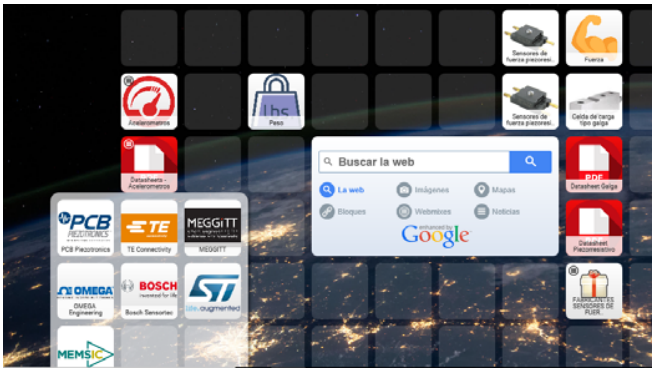
Thermistor	
Manufacturer	HANNA instruments
Description	It is a probe for general uses (liquids), NTC thermistor for applications such as liquids, air and contact. 1
Technical characteristics	Model HI 762BL Range -50 a 150 ºC Precision +/- 0,2 ºC Probe error: +/- 0,2 ºC Reply time 15 s Handle probe ABS Material Stainless steel. Error possibility +/- 0,2 ºC
Adress	http://www.hannachile.com/catalogo/pdto~hi_762bl/Sonda-Termistor-de-Usos-Generales-Liquidos.htm
Comments	Precalibrated are provided

The solution to this problem is not quite obvious and the students should learn about a vast number of aspects in order to reach that learning outcome. In the Data Acquisition Systems subject, the 3rd chapter is devoted to the gauges but from a practical perspective (applications, ranges and parameters and selection criteria) and it will be in that section where students will be asked to develop a PLE in relation to the gauges topic.

The students already have previous knowledge about it for it is covered in the subject of Electronic Instrumentation in which they have seen the gauges topic from a physical perspective: mathematical bases for measuring the gauges and the most important parameters of functioning to have a linear measure of the process.



a) Scoopit. Load cells



b) Sensor manufacturers.

Fig. 3 Aspect of some of the developed applications that are part of the SAD PLE. a) content cure performed on scoopit about force sensors. b) webmix of mechanical variable sensors, with the compilation of different sensor manufacturers.

In previous years, students accessed to the manufacturer's characteristics of the product and they created a data sheet similar to the one in the chart above. However, this year, the methodology has also been included to make a PLE about sensors:

- To study the functionality of the sensors and the static and dynamic parameters which define its performance.
- To analyze the sensors selection criteria according to the aimed variable to monitor: temperature, mechanic variables (position, speed, weight…), electric variables (voltage, intensity or power)
- To create a webmix with Symbaloo to consult the manufacturers' characteristics of the sensors, information related to the sensors application notes, sensors more frequent applications, websites in which they are sold and blogs related to the sensors study.
- To join the Google+ community and post and share all the aspects related to the project, doubts…
- To create an account on Feedly in students group to organize and classify the interesting posts related to gauges for that subject, enterprises which cover the monitoring of variables and the progress in the sensors field.
- To create an account on Scoopit as a tool which enables the selection of the most interesting contents. The students have to create a mind map on board with some of the learned sensors.

IV. Description of the Experience

As mentioned before, that project consists on the implementation of a PLE about sensors and the selection criteria for them. Students have been given the advice of searching all the information on websites or blogs, manufacturers of gauges, characteristics sheets, application notes, most frequent uses of gauges as well as the selection criteria according to the aimed variable to measure. Then, students select the contents, tailor and share them with the rest of the group throughout Symbaloo, Google+, Feedly and Scoopit. To avoid the minimum loss of time within tool engagement, students have been formed about their correct use and configuration at a basic level.

In Fig.3 it is displayed the aspect of one of the developed applications, being part of the SAD`s PLE.

- Part a) of the diagram shows the information that students have previously worked through following the characteristics sheet made by a force sensor manufacturer, applying for the previously mentioned content cure definition.
- Part b) of the diagram displays a mechanical gauges variables webmix elaborated by students, compiling different force, weight and acceleration gauges manufacturers amongst others.

During the PLE development process, students created a Google+ group in order to comment and share thoughts between themselves and other external groups part of the PLE construction community, leading to a major collaboration between members of all groups.

V. Evaluation of the Experience.

A survey about SAD sensors has been made, in order to interpret the PLE students experience [22]–[25]. The purpose of this survey aims to know the strategies and tools that engineering degree students normally use during their learning process, in and out of the classroom, especially the ones occurring in a digital context.

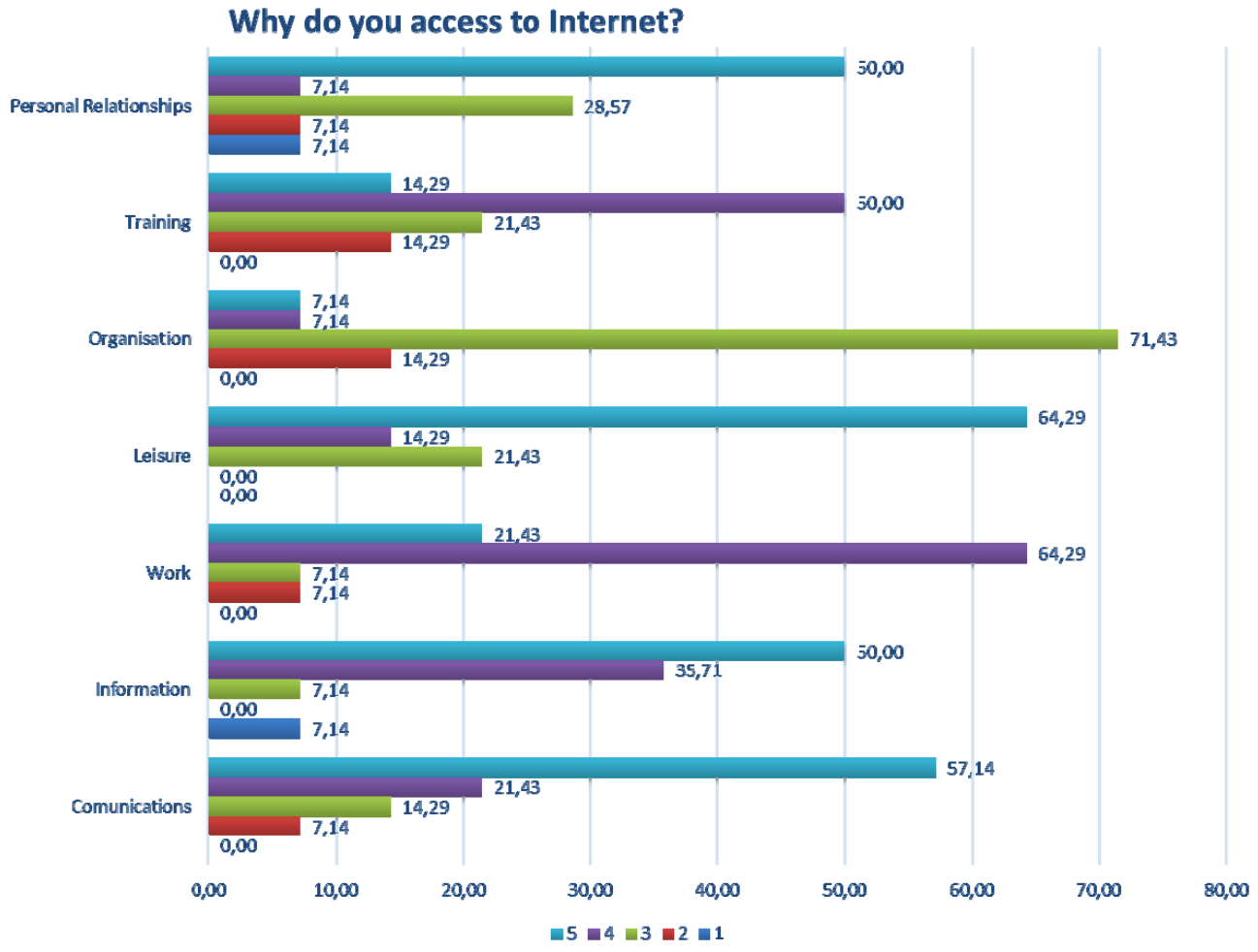


Fig. 4. Students evaluation about web browsing in different areas.

As previously mentioned, the survey intends to compile students opinions about their personal learning environment, without making such concept explicit. The survey consists of a Likert based answer sheet with six options: (1) Totally disagree; (2) Disagree; (3) Agree nor disagree); (4) Agree; (5) Totally agree; (6) DK/NA. Fig.4 shows the obtained results when students were asked to evaluate which is the main purpose of them browsing the web.

The majority totally agree with the main use given to the internet, this being leisure (around 65% of them choose this option). With this same five points mark, communication, information and personal relationships scopes present a 57%, 50% and 50% respectively. Nowadays they totally agree or just agree given that a 85% use Internet for work while a 65% uses it for educational purposes. On the other hand, the maximum is for the option “Agree nor disagree” with more than a 71% of the votes.

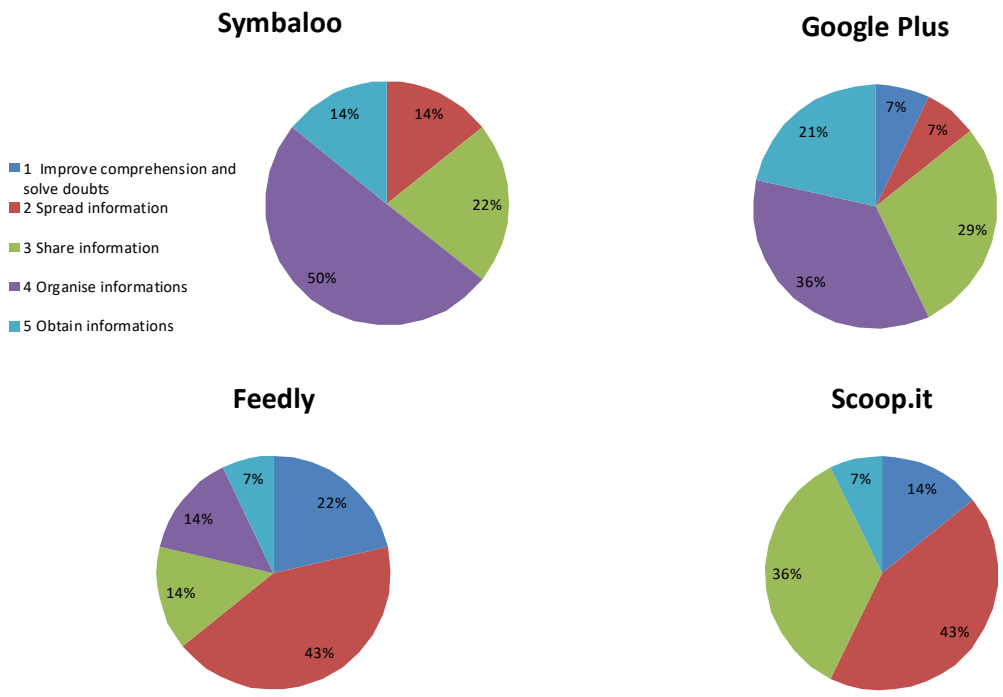


Fig. 4. Students' access to Internet evaluation st different areas.

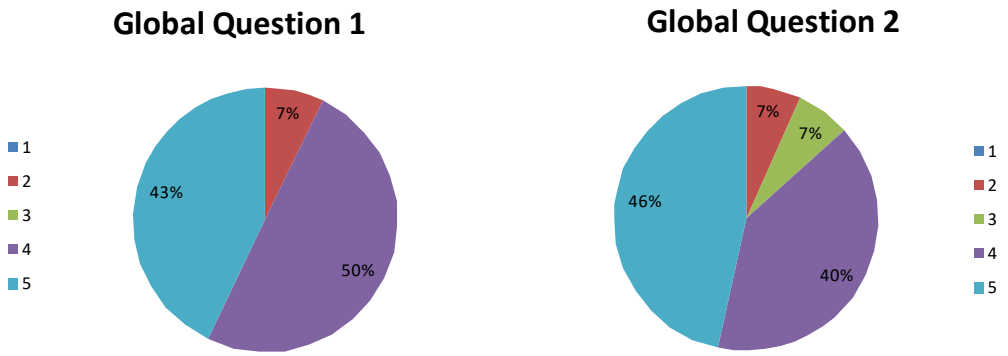


Fig. 5. Global question 1: Does the evaluation of the activity adapt to both work and effort made. Global question 2: Does the consecution of this activity help me develop abilities and competencies considered important towards my professional future?

In a second group of questions, they have identified the functionality of the new tools used and with which they will create a PLE about the gaugues learned in the Data Acquisition Systems Subject: Symbaloo, Google+, Feedly and Scoopit.

As it is shown in Diagram 5, a 50% and a 36% of the students identify the principal function of the contents organization for Symbaloo and Google+ respectively. In the case of Feedly and Scoopit, students would use them to widen and share information, which are its most highlighted functions.

Finally, two global questions were relocated. Firstly, students were asked to interpret if the evaluation of the activity was correctly adapted towards the work and effort. A 43% of students totally agreed, and 50% of them agreed on the effort evaluation. In second place, students were asked if the consecution of the activity helped them to develop competencies and abilities considered to be crucial towards facing their respective professional future.

In this case, the response percentajes went from 46% who answered a 5, and 40% who answered a 4. The 86% of the participants agreed or totally agreed about the usefulness of the experience looking forward to a professional future. On the other hand, there was only a 7% who weren't sure if the tools presented to create a personal learning environment were of any use. These results encourage teachers to enhance this experience to many different areas and subjects regarding the teaching innovation project.

VI. Conclusions

According to the compiled information previously exposed, it's interesting to see how students from this degree tend to associate web browsing with leisure activities, communication and infotainment, rather than areas like work, organization skills or curricular development.

Students collaborated together in order to develop a PLE about one of the most complex and varied themes of the SAD subject. This self-made environment can be completed at the same pace in which the students develop their own skills on each of the subjects areas. The students also had access to the tools they were offered, encountering no difficulty whatsoever in order to use them correctly.

As it follows, students were consulted about the overall experience; by answering a survey, their experience gets monitorized and feedback is sent to the subject investigators. Firstly, students were asked to assess if the evaluation of the activity correlates with both the effort and work accomplished. According to the results, the 93% of the students assessed the experience as “very positive”.

Finally, once all the information is gathered and put together, it is important to highlight how the work done (including all of the associated activities for the PLE development) has been positively assessed by students not only referring to the SAD area, but also remarking the learning process carried out within other engineering scopes. This can be reaffirmed with the fact that 86% of the interviewed “totally agree” or “agree” about the experience being useful towards a more professional orientated future. Teachers receive positive feedback from this valuations, which can make them expand the experience to other related subjects involved in the teaching innovation project, defined as: “Environment integration and personal learning schemes as a way to enhance teaching in a college engineering degree (PLE - PLN)”, in which the proposal is framed.

Acknowledgments

The authors wish to thank the Vice President for Academic, Educational Innovation and Professor Staff of the University of Jaen to subsidize the Project for Promoting of the Entrepreneurial Culture *“Creación de entornos personales de aprendizaje para iniciar en el emprendimiento a los estudiantes de ingeniería”*. We also would like to thank the University of Jaén for the programme: *“Plan de Apoyo a la I+D+I 2014-2015. Prorrogado hasta 2016”*.

Referencias

[1] T. Mauri, 1950- Coll César, and J. Onrubia Goñi, “La evaluación de la calidad de los procesos de innovación docente universitaria. Una perspectiva constructivista,” RedU. Rev. Docencia Univ., pp. 1–11, 2007.

[2] M. Guerrero and M. López, “Criterios para la Evaluación de los Proyectos de Innovación Docente Universitarios/Evaluation Criteria for University Teaching Innovations Projects,” Estud. Sobre Educ., vol. 26, pp. 79–101, 2014.

[3] L. Castañeda and J. Adell, Entornos personales de aprendizaje: claves para el ecosistema educativo en la red. Alcoy: Marfil, 2013.

[4] S. Schaffert and W. Hilzensauer, “On the way towards Personal Learning Environments : Seven crucial aspects,” eLearning Pap., vol. 9, no. July, pp. 1–11, 2008.

[5] M. Van Harmelen, Personal Learning Environments, vol. 16, no. 1. 2006.

[6] J. Adell and L. Castañeda, “Los Entornos Personales de Aprendizaje (PLEs): una nueva manera de entender el aprendizaje,” Roig Vila Fiorucci M, 2010.

[7] M. Power, Emergence and Innovation in Digital Learning: Foundations and Applications. 2016.

[8] N. Sclater, “Web 2.0, Personal Learning Environments, and the Future of Learning Management Systems,” Educ. Cent. Appl. Res., vol. 2008, no. 13, pp. 2008–2009, 2008.

[9] S. Wilson, “Patterns of personal learning environments,” Interact. Learn. Environ., vol. 16, no. 1, pp. 17–34, 2008.

[10] P. J. Sotorrío Ruiz, F. D. Trujillo Aguilera, F. J. Pacheco Sánchez, and A. Pozo Ruz, “Técnica ‘Hazlo Tú Mismo’ para la creación de un entorno personal de aprendizaje en el estudio de los microprocesadores,” XI Congr. Tecnol. Aprendiz. y Enseñanza la Electrónica, pp. 404–410, 2014.

[11] J. D. Aguilar-Peña, C. Rus-Casas, F. Muñoz-Rodriguez, M. Jiménez-Torres, and M. A. Peña-Hita, “Educational applications that promote Personal Learning Environment (PLE),” in Proceedings of 2016 Technologies Applied to Electronics Teaching, TAEE 2016, 2016.

[12] G. A. López Moreno, J. A. Jiménez Builes, and W. S. Puche, “Modelo De Entorno De Aprendizaje Personal Ubicuo (uPLEMO),” Actas TAEE 2016, pp. 275–282, 2016.

[13] P. R. H. Ramos, M. Á. Conde, and F. J. G. Peñalvo, “Differences and similarities in use and acceptance of PLEs between universities in Ecuador and Spain,” Proc. 2014 Work. Interact. Des. Educ. Environ. - IDEE ’14, pp. 70–76, 2014.

[14] P. R. Humanante-Ramos, F. J. García-Peñalvo, and M. Á. Conde-González, “Electronic devices and web 2.0 tools: usage trends in engineering students,” Int. J. Eng. Educ., vol. 33, no. 2B, pp. 790–796, 2017.

[15] I. Nafría, “Web 2.0. El usuario, el nuevo rey de Internet,” 2007.

[16] R. Bhargava, “Manifesto For The Content Curator: The Next Big Social Media Job Of The Future?,” Influential Marketing Blog, 2009. [Online]. Available: http://www.rohitbhargava.com/2009/09/manifesto-for-the-

content-curator-the-next-big-social-media-job-of-the-future.html. [Accessed: 21-Jan-2018].

[17] J. Guallar and J. Leiva-Aguilera, El content curator. Guía básica para el nuevo profesional de internet. Barcelona, 2013.

[18] J. Guallar and J. Leiva-Aguilera, “Las 4 s’s de la content curation,” in El content curator: guía básica para el nuevo profesional de Internet, 2013, p. 119-.

[19] Escuela Politécnica Superior de Jaén, “Memoria de verificación del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial por la Universidad de Jaén.” Jaén, p. 104, 2015.

[20] S. Urbina, M. A. Cormenzana, M. Conde, and C. Ordinas, “Las páginas de inicio como herramientas de ayuda para orgnizar el PLE. Un análisis comparativo.,” EDUTEC. Rev. Electrónica Tecnol. Educ., vol. 43, pp. 1–14, 2013.

[21] P. R. Humanante-Ramos, F. J. García-Peñalvo, M. A. Conde-González, and D. P. Velasco-Silva, “Diagnóstico del uso de los dispositivos electrónicos y de las herramientas web 2.0 desde un enfoque PLE, en un grupo de estudiantes de ingeniería Diagnostic of use of electronic devices and Web 2.0 tools from a PLE approach, in a group of engineering stud,” Innovación y Compet., no. Cinaic, 2015.

[22] M. P. Prendes-Espinosa, L. Castañeda-Quintero, I. M. Solano-Fernández, R. Roig-Vila, M. V. Aguilar- Perera, and J. L. Serrano Sánchez, “Validación de un cuestionario sobre hábitos de trabajo y aprendizaje para futuros profesionales: Explorar los Entornos personales de Aprendizaje,” Rev. ELectrónica Investig. y EValuación Educ., vol. 22, no. 2, pp. 1–46, 2016.

[23] M. P. Prendes, L. Castañeda, R. Ovelar, and X. Carrera, “Componentes básicos para el análisis de los PLE de los futuros profesionales españoles: en los albores del Proyecto CAPPLE,” Edutec. Rev. Electrónica Tecnol. Educ., no. 47, pp. 1–15, 2014.

[24] P. Prendes, L. Castañeda, I. Gutiérrez, and M. M. Sánchez, “Personal Learning Environments in Future Professionals: Nor Natives or Residents, Just Survivors,” Int. J. Inf. Educ. Technol., vol. 7, no. 3, pp. 172–178, 2017.

[25] M. J. Romero-Tirado, “Iniciación a la curación de contenidos en la universidad: una experiencia en el área de psicobiología,” Rev. Educ. a Distancia, vol. 0, no. 49, 2016.

Implementation of an Educational Platform on Power Quality

Aurora Gil-de-Castro, Isabel M. Moreno-Garcia, Victor Pallares-Lopez, David Matabuena, Ricardo Medina-Gracia and Antonio Moreno-Munoz
Departamento de Ingeniería Electrónica y Computadores
Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Edificio Leonardo Da Vinci, E-14071 Córdoba, España
agil@uco.es

***Abstract*— This paper describes a laboratory setup that allows students to gain knowledge in Electrical Engineering and Electronics. In this paper, the developed lab for power quality (PQ) monitoring is described. The set is implemented using the National Instrument (NI) Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite (ELVIS) and custom-made load boards. The software is based on the NI LabVIEW development environment. The set has been developed and employed for teaching electronic and instrumentation courses within the Master's degree in Distributed Renewable Energies from the University of Cordoba. The paper shows different practical lessons that are designed to perform typical PQ measurements such as power, frequency, RMS or THD.**

Keywords*— *Engineering education, power quality, virtual instrumentation.

I. INTRODUCTION

Electrical and electronic engineering education is based on practical work which complements the theoretical teaching. However, not always is possible to take those practical lessons, as the high number of students attending courses, as well as the discipline itself, make that not all the subjects are prone to develop real practical lessons. Therefore, educators need to re-conceptualize fundamental issues of teaching, learning and assessment in nontraditional spaces. To integrate this new educational approach and the adaptation of embedded systems in the remotely controlled laboratory is therefore a challenge.

One example is found in [1], which aim is to establish a real-time web-based laboratory platform, able to access the laboratory set-up from a remote location. It uses LabVIEW (LABoratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench), as is one of the primary choices in designing control and analysis solutions virtually and/or remotely in the engineering technology and education area.

A complete platform to understand power quality (PQ) concepts and analyze the characteristics of the power distribution network has been developed. The platform has been used with students enrolled in the Master's degree in Distributed Renewable Energies from the University of Cordoba (https://www.uco.es/estudios/idep/masteres/energias-renovables-distribuidas). More specifically, in the subject entitled Quality and Reliability of the Power Grid, within the above Master's Degree, the network is studied from the PQ point of view, including the origin and effects of different disturbances [2].

The system that students use for those practical lessons includes three major components: 1) PC equipped with the LabVIEW and custom-developed application-specific software, 2) National Instruments Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite (NI ELVIS) engineering lab workstation and a Data Acquisition (DAQ) module, and 3) a custom-designed integrated circuit (IC) testing load board. The advantage of using this programming language is that it is easy to use, and students can rapidly interface with measurement and control hardware, and analyze data.

For each system, the students are required to learn the underpinning theoretical and practical test engineering study materials, develop and implement the LabVIEW-based application specific software and graphic user interface (GUI) so to enable the system to perform the required test types automatically.

The aim of the proposed exercises is to easily understand PQ basic parameters by students. So that, a resistor as well as a series resistor and inductance loads are connected to the grid and the different magnitudes are calculated. Active, reactive and apparent power, energy, as well as magnitude and frequency and harmonics are calculated. The evaluation of the practical lesson consists on a summary of the main results, as well as the code in LabVIEW.

The paper is organized as follows. Section 2 describes the materials used in the practical lessons, including hardware and software. Section 3 presents the implemented power quality disturbances, including Power and Energy, Magnitude and Frequency, Harmonic and Unbalance. Section 4 includes the final implementation. Finally, Section 5 contains the conclusions.

II. MATERIALS

A. Hardware

The NI ELVIS Engineering Lab Workstation provides a complete teaching solution for engaging students in hands-on

This work has been supported by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness under Project TEC2016-77632-C3-2-R. Also, the authors would like to thank the support of the University of Cordoba, through the program "III Becas Semillero de Investigación".

labs involving areas such as analog circuits, power electronics, and instrumentations among others. It includes 12 software-based virtual instruments including an oscilloscope, digital multimeter, function generator, variable power supply, and Bode analyzer [3].

The NI ELVIS has 8 differentials or 16 single ended channels. In the proposed practical lesson, students have connected voltage and current transducers, manufactured by the University as part of a Final Master Project, to the acquisition board in order to adapt voltage levels to the input of the NI ELVIS.

The voltage (LEM LV 25-P [4]) and current (Honeywell 0730 [5] transducers are used to measure AC current with galvanic separation between the primary and secondary circuit. According to the voltage transducer datasheet, a voltage of up to 500 V can be measured, and a 40 kΩ was selected as R1 to transform the AC voltage in a nominal current of 10 mA at full scale. At the output block, a high precision resistor was selected in order to transform the current into a voltage within the range of the acquisition card (R_M in Fig. 1).

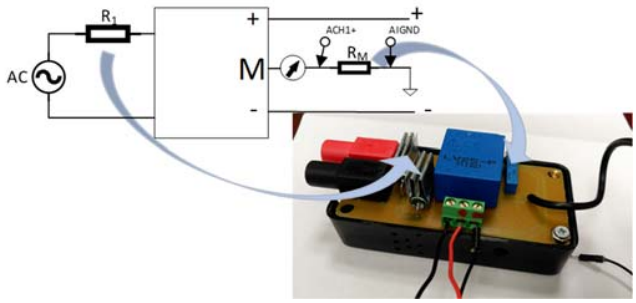


Fig. 1. Signal Conditioning of the DC and AC voltage transducers.

For current measurement, a similar principal schema is used. A conditioning of current measurements was needed to adjust the levels for the data acquisition card. Fig. 2 shows an example of the conditioning circuit of the developed current transducer and the real implementation. In this case, the output range is selected and calibrated using multi-turn precision resistors, labelled as R_M in the figure.

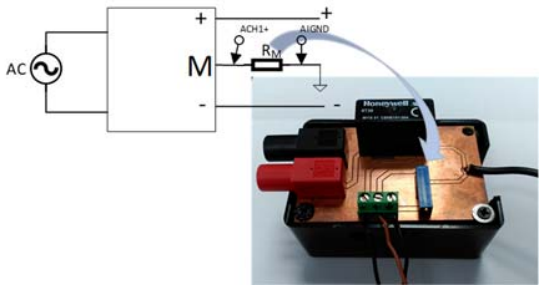


Fig. 2. Signal Conditioning of the continuous (DC) and alternating (AC) current transducers.

The NI ELVIS was used because students can easily test the circuit using the integrated oscilloscope and multimeters. Voltage and current waveforms are easily seen in the integrated oscilloscope, as well as measurements as active power are easily performed with the integrated multimeter. But the big advantage comes from the acquisition card, as student can understand the voltage and current processing, as well as the power quality concepts from a mathematical point of view. The aim of the practical lesson is to calculate the harmonic spectrum, power, energy, displacement power factor, and some other parameters using the information from the voltage and current waveform vectors.

The whole platform is then connected to a computer where the signals are shown. The final implementation is then described in section 4.

B. Software

The PQ analysis data acquisition was performed through virtual instruments (VI) developed with the NI LabVIEW graphical programming tool and operating in a computer connected to NI ELVIS platform. Students are provided by a LabVIEW project (downloaded from Moodle platform http://moodle.uco.es/m1718/) with four VIs, each of them focused to different PQ aspects: energy and power, magnitude and frequency, harmonics, and unbalance. Each of them will later be described in section III. The first step before indeed using each VI is focused in explaining the importance of knowing the corresponding magnitude in the PQ analysis, including the definition, the source of occurrence, and the mitigation procedures. Then, the Toolkit functions that can be used for that magnitude are explained. Later, the procedure to include such function in the corresponding VI is described, while students are implementing that function into their own VI. Eventually, the student must run the library and analyse the monitored signals.

AC voltages and currents measurements were acquired according to several electromagnetic compatibility standards, such as IEC 61000-4-7:2002 [6], IEC 61000-4-15:2010 [7], and IEC 61000-4-30:2008 [8]. This processing was possible through the Electrical Power Suite Toolkit, an extra resource not licensed by LabVIEW. This Toolkit includes a collection of tools for measuring, analyzing, monitoring, and recording electrical power data.

III. Implemented Power Quality Disturbances

The aim of the practical lesson is to experimentally analyse PQ magnitudes. The general methodology used for the development of the lesson consists in a student-guided integration of the functions contained in the LabVIEW Electrical Power Toolkit to explain students the general operation. To do that, the responsible of the subject has an identical characteristic working place than students has. The code is projected in the screen while the integration of the different functions to be used is explained step by step.

Before working with real signals, the practical lesson is prepared to make students work with synthetical current and voltage signals simulated by themselves. The aim is allowing students to emulate different PQ disturbances, so that they can study and check the efficiency of the libraries to be used. Fig. 3 shows the main VI panel that allows student configuring the synthetical signals.

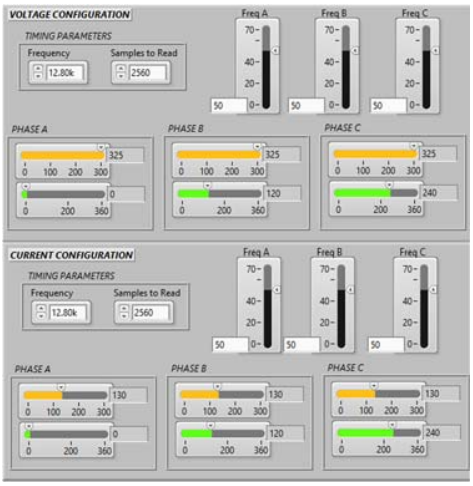


Fig. 3. Voltage and current configuration panel.

In the upper part of Fig. 3 the frequencies can be adjusted, individually for each phase. Below the peak value and phase angle with respect to A phase can be introduced. Moreover, as they are synthetical signals, three-phase current configuration is also possible. Similar to the voltage waveforms, frequency, peak value and phase angle of the three phases can be modified.

There is another panel where students can indeed check the waveforms. The three-phase voltage and current waveforms are shown in Fig. 4. Both, Fig. 3 and 4 are provided to the students for testing the Toolkits about power and energy, magnitude, frequency and unbalance. The starting VI for the harmonic measurement is different from the previous three cases and will be explained in section C.

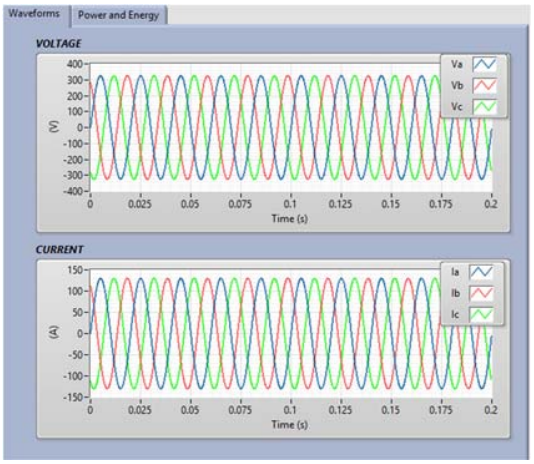


Fig. 4. Voltage and current waveforms visualization panel.

A. *Power and Energy*

In this test the students must generate different voltage and current waveforms, and measure power and energy values of those signals with the Power and Energy VIs. Power VI returns power values that this VI calculates through a basic measurement time interval of 10 cycles. The students calculate for each phase power values from voltage and current spectra (Fig. 5 left). These values are active power; reactive power; apparent power; fundamental active power; fundamental reactive power; cosine; power factor.

With the Energy VI, the students calculate energy values for a specified interval length established in one hour (Fig. 5 right). This VI calculates the energy values from the data provided in the Power VI. These values are active energy; reactive energy; apparent energy; fundamental active energy; fundamental reactive energy; active positive energy; active negative energy; reactive inductive energy; reactive capacitive energy.

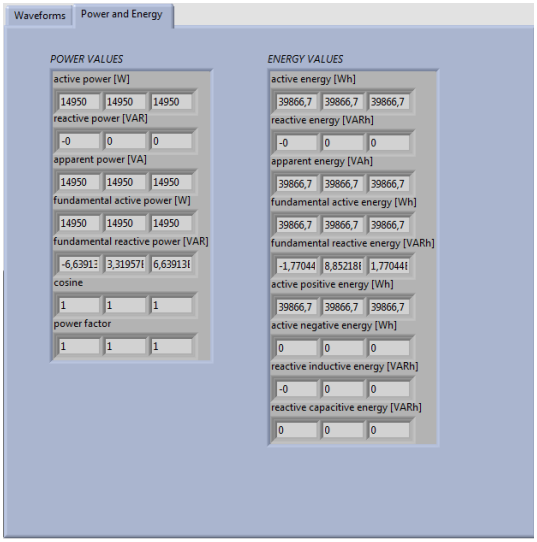


Fig. 5. Power and energy panel.

B. *Voltage and current magnitudes and Frequency*

The aim of this part of the practical lesson is to calculate voltage and current RMS values, overvoltage and undervoltage, as well as measure frequency using the Zero-crossing function. To do that, students analyze their RMS value, calculating mean value, maximum and minimum deviation.

Both for voltage and current, firstly they use the RMS VI which returns RMS value of the magnitudes for a 10-cycle block for three- phases. Secondly, after calculating the RMS value, students calculate underdeviation and overdeviation for each voltage phase with the Deviation VI.

Finally, students use the Frequency VI to calculate the average frequency using zero crossing function. The frequency is only calculated over one phase.

As can be seen in Fig. 6, the instantaneous frequency values, RMS values of three-phase voltages and currents are shown in graphs to observe their trends. While under and over values are shown in numerical indicators. In the displayed example (Fig. 6) the A-phase frequency, the B-phase voltage amplitude and the C-phase current amplitude were varied.

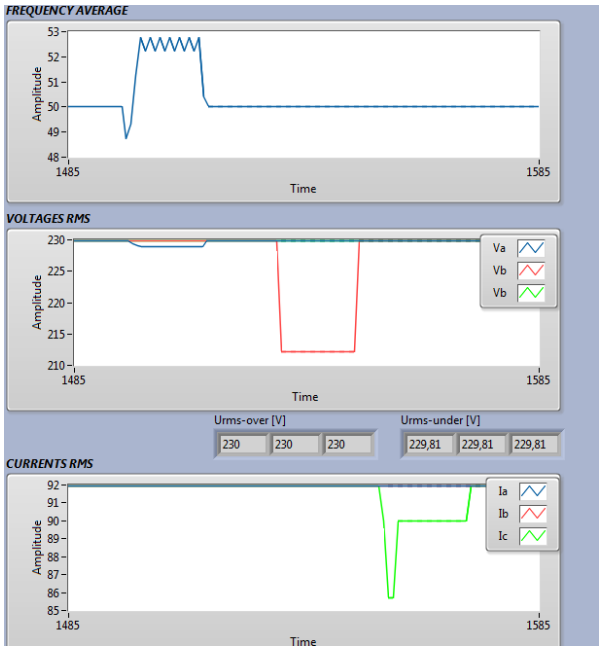


Fig. 6. Measurements panel.

C. Harmonic

In this section, the aim was to calculate the total harmonic distortion (THD) of the voltage and current, compute the harmonics and interharmonics according to the grouping method, and add different harmonic amplitudes to the fundamental to analyze results from that. The harmonics VI is used to perform harmonics analysis according to IEC 61000-4-7:2002 [6] and IEC 61000-4-30:2008 [8].

To test waveforms containing harmonic distortion, the addition of harmonics to the fundamental voltage waveform is included in the voltage configuration panel. For each phase and each harmonic order, the level (in percent of fundamental) as well as the phase angle shift to the corresponding fundamental can be added (Fig. 7). In this case, the phase A has a 50% FND of harmonic 3, and 20% of FND of harmonic 9, both with 0º phase angle.

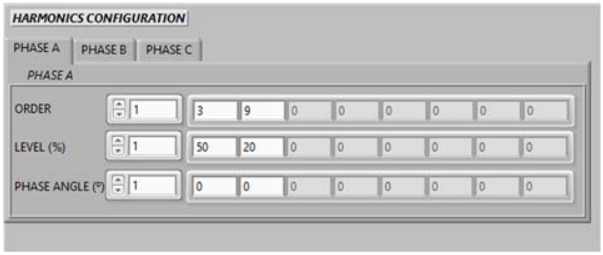


Fig. 7. Harmonics configuration panel.

When the magnitude and phase angle of different harmonic orders are added to the fundamental, the resulted distorted voltage waveform is shown in the corresponding Phase A (B or C according to the phase) tab. Fig. 8 above (equal in each phase) shows the fundamental voltage, and below is shown the resultant voltage waveform after adding 3rd and 9th harmonic orders to the fundamental. In the waveforms tabs appears the three-phase voltage and current (similar to Fig. 4).

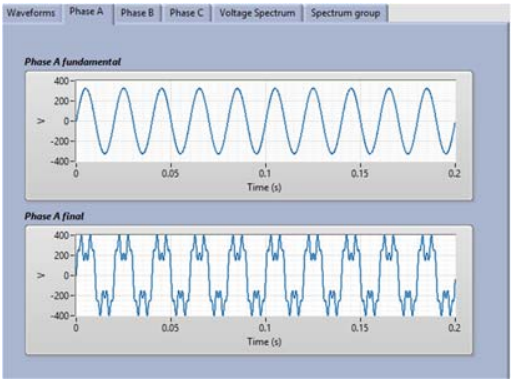


Fig. 8. Distorted voltage waveforms panel.

To contrast those results, the voltage spectrum is used to compute the FFT spectra of input voltage waveforms. This VI returns FFT spectra as complex spectra of voltage, up to 50th order (2500 Hz) with a frequency resolution around 5 Hz (over 10-cycle window) in RMS. Fig. 9 above shows for phase A the 3rd (150 Hz) and 9th (450 Hz) harmonic orders with 50% of FND (115 V) and 20% of FND (46 V) respectively with a 230 VRMS fundamental voltage. And for phase B the 5th (250 Hz) and 7th (350 Hz) harmonic orders with 30% of FND (69 V) and 10% of FND (23 V) respectively.

The voltage THD is calculated according to IEC 61000-4-7:2002 [6]. This VI calculates the group THD (up to the 40th order), expressed in percentage for each phase. Fig. 9 below shows 53.8% in phase A and 31.6% in phase B.

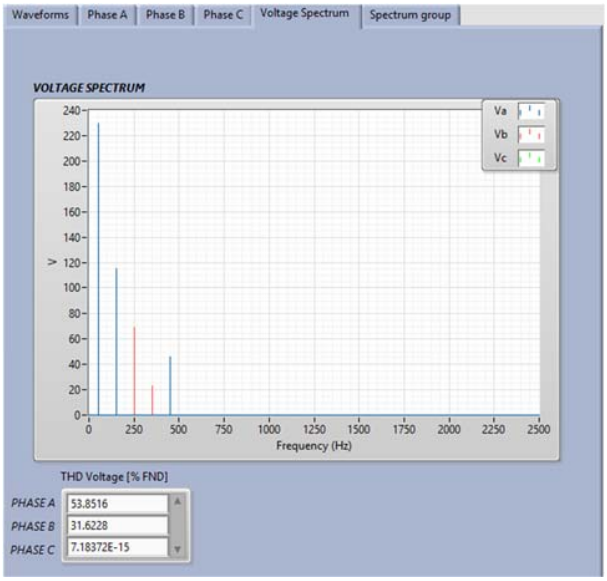


Fig. 9. Voltage spectrum panel.

D. Unbalance

This test is intended for students to implement the code to measure unbalance factors and symmetrical components, display the voltage and current diagram. To do this, they must

use the following library functions: Symmetrical Components VI and Unbalance VI.

The Symmetrical Components and Unbalance VIs are used to calculate symmetrical components and analyze voltage and current unbalance for a three-phase electrical power system, as defined in IEC 61000-4-30:2008 [8].

On the one hand, Symmetrical Components VI calculates voltage, current, and power symmetrical components for a 10-cycle block. This VI is used to calculate the fundamental voltage symmetrical components. All the symmetrical components have the following array order: zero, positive and negative sequence symmetrical components

On the other hand, the Unbalance VI is useful to analyze the voltage or current unbalance of a three-phase electrical power system. This VI is used to calculate negative sequence (u2) and zero sequence (u0) expressed as a percentage of voltage unbalance, fundamental voltage unbalance, percentage of current unbalance, and fundamental current unbalance.

The three-phase voltage and current polar plot is also shown in Fig. 10 (below). In the test shown in Fig. 10, an unbalance in the three-phase voltage signal was configured through a voltage sag in phase B and a phase angle shift in phase C. Similarly, an unbalance in the three-phase voltage signal was configured through a voltage sag in phase C and a phase angle shift in phase B.

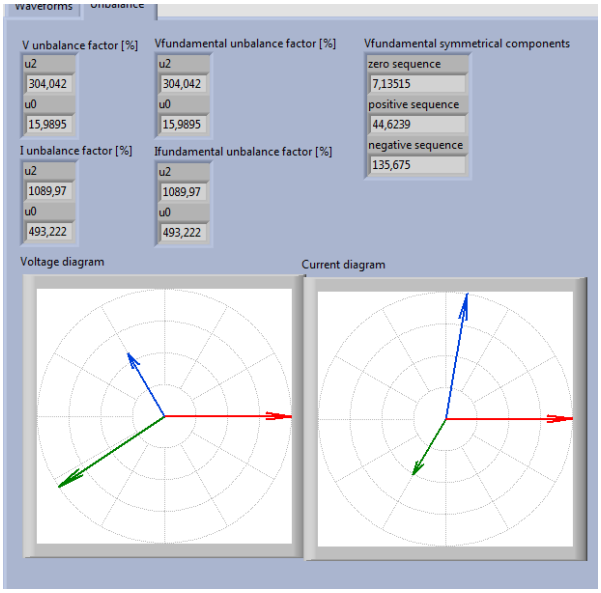


Fig. 10. Distorted voltage waveforms panel.

IV. Final Implementation

The NI ELVIS and the transducers are used to analyze PQ data over different loads. To do so, voltage and current are recorded when different loads as a 500 Ω load, and a series resistor and inductance load are connected to the grid. Finally, students calculate different magnitudes over that signals. Active, reactive and apparent power, energy, as well as magnitude and frequency and harmonics are calculated, and those values are asked to students as a part of the evaluation.

Fig. 12 shows the final implementation that students should perform by the end of the session. It must integrate all the measurements included in section III in a single VI project (Fig. 11), connect the loads to the acquisition system, and generate different disturbances.

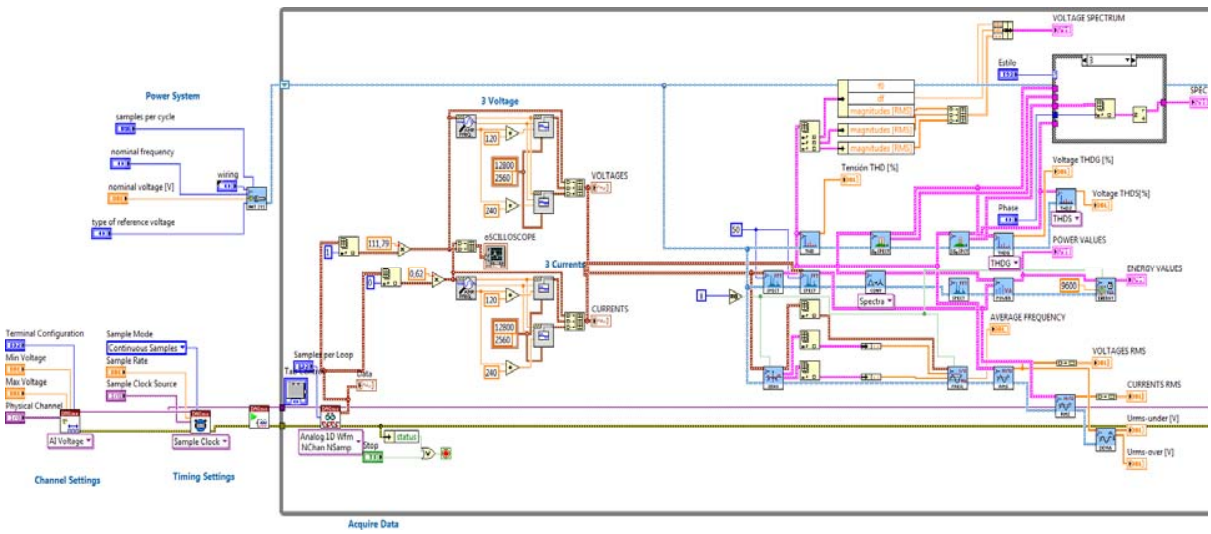


Fig. 11. LabVIEW final code.

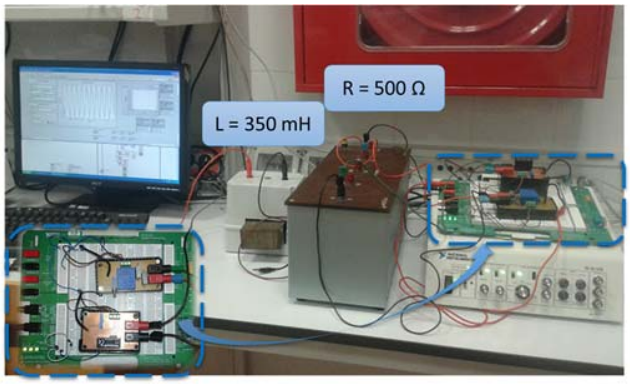


Fig. 12. Final implementation.

Students are also provided with a table to be filled with the different connected loads. As an example, Table I contains the demanded data when connected to a resistor-inductance series load.

TABLE I. DATA TO MEASURE

Resistive and inductance series load			
Data	***Value***	***Data***	***Value***
Active power		Average frequency	
Reactive power		V RMS	
Aparent power		V RMS over	
Fundamental active power		V RMS under	
Fundamental reactive power		THD	
Displacement power factor (cos φ)		THD grouping	
Total power factor		THD subgrouping	

V. CONCLUSIONS

The aim of the proposed exercises is to easily understand PQ basic parameters by students. Active, reactive and apparent power, energy, as well as magnitude and frequency and harmonics are calculated. The evaluation of the practical lesson consists on a summary of the main results, as well as the code in LabVIEW.

Some of the key point of the tool is that includes different learning approaches such as exploratory learning and inquiry-based learning, as students develop a tool based in a preliminary version, and they can check the proper working of the platform. The tool presents interactivity, which makes the tool more attractive, as well as use elements of multimedia for visualisation and direct analysis.

Students appreciate these practical lessons to better understand such a deep field as PQ is. A satisfaction questionnaire was carried out between master degree students to evaluate the usefulness of the platform. Such a tool was positively evaluated, and the platform efficiency in the learning process showed a final examination main score of 4.5 out of 5 points.

REFERENCES

[1] A. Akar, A. Yayla, and B. Erder, "A labVIEW-based remotely controllable and accessible laboratory platform for communication systems II lecture experiments," *Gazi University Journal of Science*, vol. 27, pp. 965-977, 2014.

[2] M. T. Chew, S. Demidenko, M. P. L. Ooi, and Y. C. Kuang, "Family of low-cost NI ELVIS/LabVIEW-based semiconductor testers for engineering education," in *2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications, CIVEMSA 2017 - Proceedings*, 2017, pp. 165-170.

[3] N. ELVIS. Available: http://www.ni.com/pdf/product-flyers/ni-elvis.pdf

[4] L. L. 25-P. Available at: http://www.lem.com/docs/products/lv_25-p.pdf

[5] H. 0730. Available at: https://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-current-csn-series-catalog-pages.pdf

[6] "Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto, IEC 61000-4-7, August 2002.

[7] I. E. Commission, "Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-15: Testing and measurement techniques - Flickermeter - Functional and design specifications, IEC 61000-4-15, 2010.

[8] "Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods, IEC 61000-4-30, October 2008.

SESIÓN IV.A: AUTOMÁTICA Y ROBÓTICA 2

Implementación de una línea electiva en automatización avanzada para ingeniería electrónica

Alexander Cortés Llanos
Coordinacion Ingenieria electronica
Universidad ECCI
Bogota, Colombia
acortesll@ecci.edu.co

Luis Fernando Rico Riveros
Coordinacion Ingenieria electronica y mecatronica
Universidad ECCI
Bogota, Colombia
coordinacion.electronica@ecci.edu.co

Victor Hugo Bernal Tristancho
Coordinacion Ingenieria Mecatronica
Universidad ECCI
Bogota, Colombia
vbernalt@ecci.edu.co

***Abstract*— Las asignaturas electivas les brindan a los programas de estudio la posibilidad de ser pertinentes y actuales. La línea electiva de automatización avanzada en ingeniería electrónica de la universidad ECCI, le permite al estudiante adquirir conocimientos para el diseño y la implementación de sistemas automatizados para procesos industriales y automatización de edificios de mediano y gran tamaño utilizando herramientas de hardware y software de tipo profesional.**

Keywords*— *Docencia en automatización, redes de Petri, GEMMA.

I. INTRODUCCION

El trabajo para la creación de la nueva línea electiva comenzó a finales del año 2015 con un estudio de pertinencia a nivel sectorial y regional. Los resultados y análisis de este estudio llevo al comité curricular a la propuesta de tres asignaturas de la línea en automatización avanzada orientada a los modelos de ingeniería para el diseño e implementación de sistemas automatizados de pequeña y gran envergadura en procesos industriales y la inclusión de automatización para edificios.

Las tres asignaturas son teóricas practicas por lo cual se diseñaron y crearon las prácticas de laboratorio propias para cada una. Se utiliza hardware y software de tipo industrial con el cual el egresado se va a encontrar en las empresas de ingeniería para la implementación. Las dos primeras asignaturas de la línea electiva se encuentran enfocadas a procesos industriales, para la primera el modelo de ingeniería utilizado son redes de Petri [1] y su implementación se realiza en laboratorios donde se utiliza bancos de electro-neumática, PLC S7-1200 marca Siemens, software TIA portal [2] y LabView [3]. Los conceptos de base de la primera asignatura son ampliados con la metodología de diseño GEMMA [4], que permite al estudiante contemplar todos los estados posibles dentro de una automatización: producción normal, marchas, paros, paradas de emergencias, mantenimiento, entre otros. La tercera y última asignatura contempla los diferentes sistemas dentro de una automatización de edificios con el objetivo de buscar interoperabilidad, control centralizado y gestión energética. El diseño se realiza a través de software de simulación y AutoCAD [5]. El trabajo está organizado de la siguiente forma: en la sección II se expone el estudio de pertinencia realizado para la justificación de la electiva, sección III trata de la estructura de las asignaturas de la línea electiva, sección IV plantea la metodología empleada en cada una de las asignaturas, por último, en la sección V se exponen los resultados obtenidos y los problemas encontrados.

II. ESTUDIO DE PERTINENCIA

Durante finales del 2015 y basados en la percepción de nuestros estudiantes y la dinámica económica de Colombia, nos dimos a la tarea de analizar la pertinencia de una nueva electiva para nuestro programa de ingeniería electrónica que nos permitiera fortalecer las competencias profesionales de nuestros egresados.

A. Informacion sectorial

Según los datos del observatorio laboral y ocupacional del Sena [6] en diciembre del 2015, casi la tercera parte de las

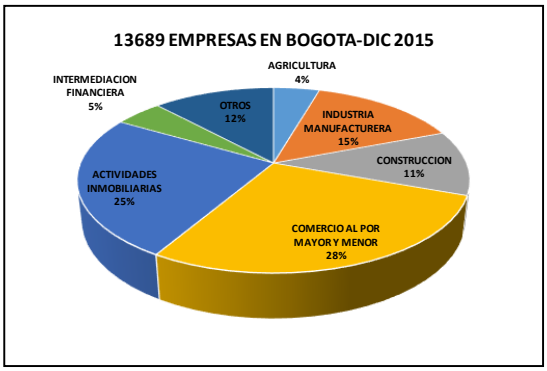


Fig. 1. Participacion de empresas por sectores en la ciudad de Bogota.

empresas (26%) en la ciudad de Bogotá, son empresas dedicadas a la industria manufacturera y de construcción. Teniendo en cuenta que, desde hace unos años por políticas de ordenamiento territorial, muchas empresas se han ubicado a las afueras de la ciudad capital, es importante tener en cuenta las empresas ubicada en el departamento de Cundinamarca, donde podría existir un mercado potencial de nuestros ingenieros.

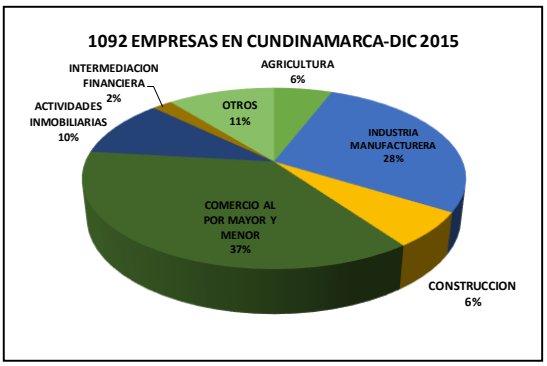


Fig. 2. Participacion de empresas por sectores en el departamento de cundinamarca.

En la figura 2, se puede apreciar que la industria manufacturera y construccion, se encuentra en el segundo lugar dentro de la actividad economica de las empresas, lo que implica un potencial de 474 empresas de diferentes tamaños: micro, pequeña, mediana y gran empresa.

B. Percepcion Empleadores

Para complementar el estudio de pertinencia y bajo un instrumento de encuesta se le pregunto a los empleadores de nuestros egresados, que contestaran una serie de preguntas con respecto al desempeño en el ejercicio profesional. Con una muestra de 132 respuestas, los empresarios evidenciaron la necesidad de fortalecer el area de control y automatizacion.

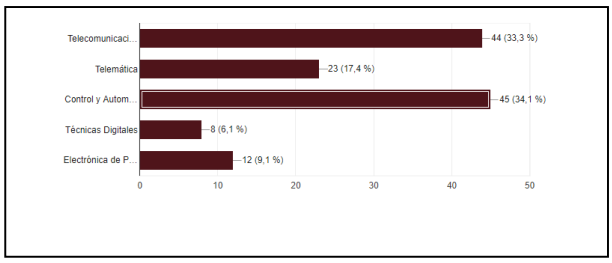


Fig. 3. ¿Cuál de las siguientes areas considera importante que los ingenieros electronicos profundicen sus estudios? Encuesta realizada dic-2015.

Después de analizar los anteriores datos, y en búsqueda de fortalecer el perfil de nuestros ingenieros electrónicos, se propuso una electiva orientada a modelos y formalismos de automatización que permitiera desarrollar competencias en el control de procesos industriales de eventos discretos y tipo *Batch*. Con el fin de que las empresas manufactureras pudiesen llevar a cabo sus procesos de actualización tecnológica contando con un recurso profesional preparado para esos nuevos retos. De la misma forma el incremento de proyectos en infraestructura para los sectores residenciales, comercio y gubernamentales exigen contar con ingenieros que diseñen e implementen diferentes sistemas que permita manejar el concepto BAS (*Building Automation System*).

III. ESTRUCTURA DE LAS ASIGNATURAS DE LA LINEA ELECTIVA

En el programa de ingeniería electrónica de la universidad ECCI, existían tres líneas electivas de profundización: control, telemática y telecomunicaciones, de las cuales el estudiante debe cumplir como requisito para poderse graduar haber cursado al menos dos.

La propuesta para la nueva línea electiva enfocada en automatización avanzada que fue aprobada por el comité curricular de la coordinación se presenta a continuación.

TABLE I. LINEA DE AUTOMATIZACION AVANZADA

SEMESTRE	ASIGNATURA
Octavo	Automatización Avanzada I
Noveno	Automatización Avanzada II
Decimo	Automatización Avanzada III

A. Automatizacion avanzada I

Uno de los principales objetivos de la nueva línea electiva era brindar un formalismo bajo modelos de ingeniería para los proyectos de automatización que permitieran realizar análisis gráfico y matemático, pero fuera independiente de la implementación. Es decir que el modelo de ingeniería se pudiera llevarse a diferentes soluciones tecnológicas como lo son: Controladores lógicos programables PLC`s, sistemas de adquisición de datos controlados por programación en LabVIEW o un arreglo de compuertas programables FPGA. La estructura de la asignatura esta orientada al diseño y análisis bajo los siguientes modelos:

- Diagramas de transición de estados, con entradas y salidas.
- Redes de Petri interpretadas
- Redes de Petri binarias
- GRAFCET

B. Automatizacion avanzada II

Después de que el estudiante adquiere algunas destrezas en el diseño de la producción normal de un proceso de eventos discretos. El siguiente paso es contemplar otros posibles estados que pueden ocurrir en el sistema, además de la intervención coordinada de un operador. Procedimientos de marcha, paro y emergencia deben de ser analizados e implementados en nuestros sistemas de automatización para

procesos industriales. Para lo cual utilizamos la guía metodológica GEMMA (Guide d'Etude des Modes de Marche et d'Arrêt) y sus 16 posibles estados entre los cuales tenemos seis estados para marcha, siete estados de paro y tres de emergencia. Esta asignatura está orientada a desarrollar competencias de diseño en los estudiantes utilizando:

- GRAFECT base y su ampliación de acuerdo a GEMMA
- GRAFCET parciales de acuerdo a GEMMA
- Coordinación horizontal y vertical con GRAFCET de mando

C. Automatizacion avanzada III

Las dos anteriores asignaturas brindan las herramientas para el fortalecimiento en el análisis y diseño de sistema de procesos industriales, mientras que la ultima materia de la línea permite al estudiante enfocarse en la automatización de edificios o lo que se conoce en inglés como *Building Automation System BAS* [7]. El estudiante tiene la posibilidad de conocer y diseñar algunos sistemas típicos como lo son:

- Sistemas de comunicación de datos cableados e inalámbricos
- Circuitos cerrados de televisión CCTV
- Sistemas de iluminación
- Sistemas de control, acceso e intrusión
- Sistemas de detección de incendio

Además, la ultima parte del curso esta orientado a eficiencia energética de los edificios, para lo cual se exponen las políticas que tiene Colombia durante el periodo 2017-2022 y sus estrategias para lograrlo en este sector, una de ellas tiene que ver con la implementación de sistema de gestión de energía bajo la norma ISO 50001.

IV. METODOLOGIA IMPLEMENTADA EN LAS ASIGNATURAS

Nuestro programa de ingeniería electrónica esta basado en sistemas de créditos académicos, cada una de las materias de la línea de automatización avanzada tiene 3 créditos académicos, lo que implica 9 horas de trabajo en la semana, 4 horas de trabajo presencial (2 para la clase magistral y 2 para la implementación de laboratorios) y 5 de trabajo independiente.

Todas las practicas de laboratorios refuerzan los conceptos formales vistos en la clase magistral. A continuación, se expone el manejo dado a cada una de las asignaturas.

A. Metodologia en Automatizacion avanzada I

- Se trabaja inicialmente con problemas típicos encontrados en los procesos industriales: el control de maquinas estampadoras, de tablas de indexación, Maquinas *pick and place* entre otras. El estudiante como primera medida debe comprender la función de cada uno de los sensores y actuadores para poder establecer la secuencia de control para producción normal.

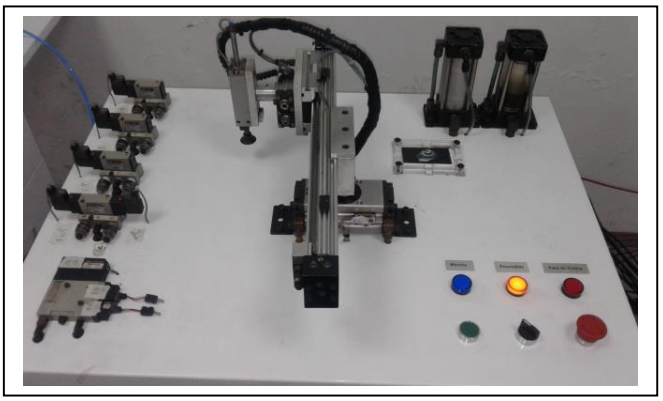


Fig. 4. Estacion de Maquina *Pick and place* que hace parte del laboratorio de electroneumatica

- El siguiente paso después de plantear la secuencia de control en un listado de tareas que debe hacer la maquina es establecer la red de Petri binaria o GRAFCET. Con lo cual se puede realizar un análisis de vivacidad y reversibilidad de la red, garantizando que no exista bloqueo dentro de su estado de producción normal.

MAQUINA PICK AND PLACE

TAREA	DESCRIPCION	SALIDAS
T1	POSICIONAR EN 1	A RETRAER Y B EXTENDER
T2	POSICIONAR EN 2	B RETRAER
T3	POSICIONAR EN 3	A EXTENDER
T4	POSICIONAR EN 4	A EXTENDER Y B EXTENDER
T5	CILINDRO ARRIBA Y ENCIENDE BOMBA	ON BOMBA
T6	CILINDRO ABAJO	C EXTENDER
T7	CILINDRO ABAJO Y ENCIENDE BOMBA	C EXTENDER Y ON BOMBA
T8	CILINDRO ABAJO Y APAGA BOMBA	C EXTENDER Y OFF BOMBA

TAREA	COMIENZA SI (Tareas)	HASTA QUE (Sensores)	AUTORIZA (Tareas)
T1	FIN REPOSO	START	T2
T2	FIN T1	B1 OR B3	T5, T7
T3	FIN T6	S1	T8
T4	FIN T7	S1B2	T8
T5	FIN T2	B3ON	T6
T6	FIN T5	B4	T3
T7	FIN T2	B4ON	T4
T8	FIN T3	S2B4 OR S1B4	T2, T1

SENSORES	DESCRIPCION
S1	A EXTENDIDO
S2	A RETRAIDO
B1	B RETRAIDO
B2	B EXTENDIDO
B3	C RETRAIDO
B4	C EXTENDIDO

Fig. 5. Listado de tareas para el diseño del control de la maquina Pick and place

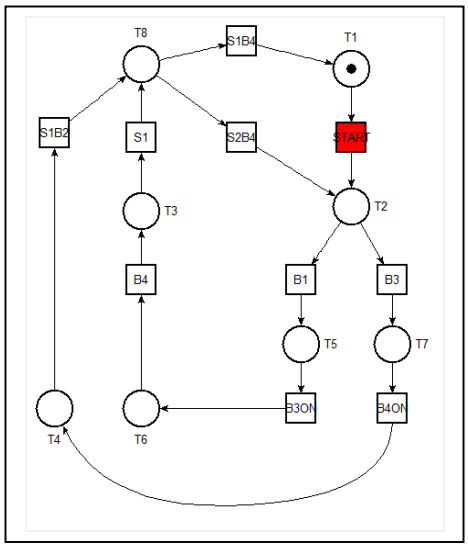


Fig. 6. Red de Petri maquina *Pick and place* utilizando TINA [8]

- Por último, tenemos la implementación de nuestro diseño. Para ello nos basamos en una metodología que consiste en mapear nuestra estructura de red de Petri o GRAFCET a lenguaje LADDER de controladores lógicos programables PLC's. Esto le permite al estudiante programar cualquier PLC, sin importar si soporta directamente programación en GRAFCET. Los pasos para la programación son los siguientes:

a) Creacion de variables en el PLC entradas, salidas y bits de memoria.

b) Inicializacion del sistema

c) Evolucion de la Red de Petri o GRAFCET

d) Activacion de salidas

- Los estudiantes tienen asignado dos horas de trabajo en el laboratorio de electroneumática para la implementación de los diferentes ejercicios de automatización. Estos espacios están diseñados para el montaje fácil y rápido de cilindros, válvulas y sensores de proximidad. Además, bajo diseño de la coordinación de ingeniería electrónica se tiene módulos que incorporan una CPU S7-1200, Pantalla HMI siemens KTP-700, los cuales están acoplados a borneras para conexión eléctrica rápida Fig. 7.

- La programación se realiza en TIA PORTAL Basic. Allí los estudiantes pueden realizar la implementación final, la cual se cargará a la CPU y también el diseño de la HMI. Este software permite monitorear en tiempo real las señales de entrada y salida, lo que permite que los estudiantes establezcan los errores ya sea, en la conexión física, líneas de programación o el modelo de la red de Petri.

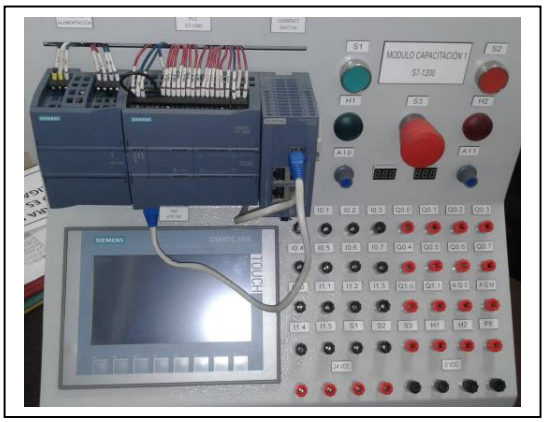


Fig. 7. Modulos de capacitacion diseñados por la coordinación de Ingenieria electronica Universidad ECCI.

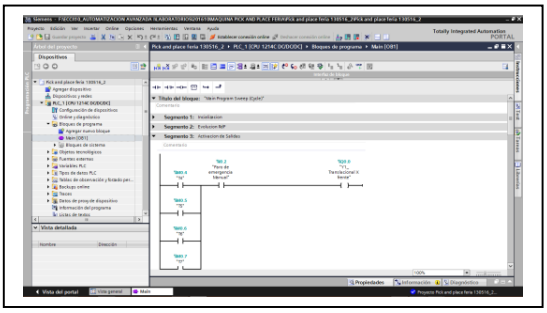


Fig. 8. Implmentacion final en TIA PORTAL v13

B. Metodologia en Automatizacion avanzada II

- El objetivo de esta asignatura es contemplar de una manera integral todos los posibles estados de un sistema automatizado en un proceso industrial. Los ajustes que se puedan hacer a los diferentes sensores y elementos finales de control. Los mantenimientos por parte de los operadores en la maquinas. Y las paradas de emergencia son estados que pueden ocurrir en la práctica.

- Es importante que el estudiante conozca una metodología o proceso secuencial formal que permita contemplar dentro de su diseño todos los posibles estados, para ello utilizamos GEMMA, Guía de modos de marcha y parada. La cual consiste en:

a) Seis procedimientos de funcionamiento

b) Siete procedimientos de paro

c) Tres procedimientos de Emergencia

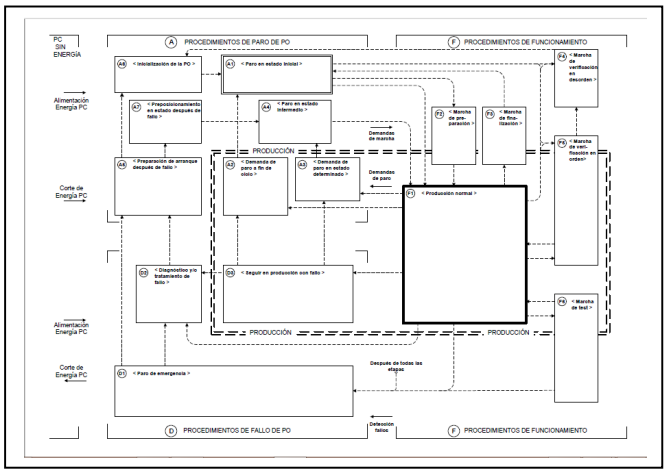


Fig. 9. Plantilla GEMMA. Tomado de [9]

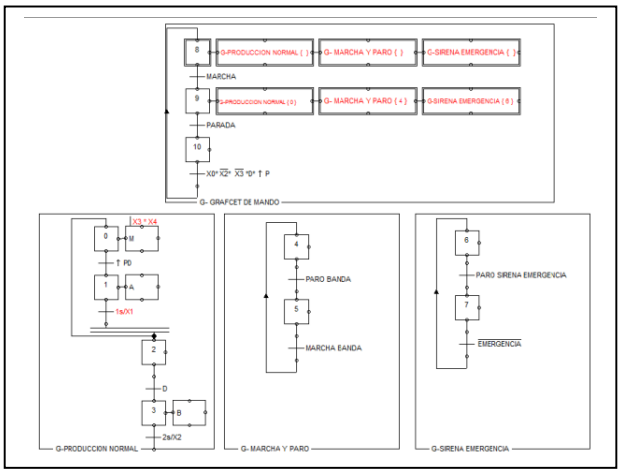


Fig. 10. GRAFCET`s parciales utilizando la metodologia de GEMMA.

- A partir del conocimiento de la funcionalidad de cada estado del GEMMA, y unas especificaciones de diseño el estudiante establece los bloques que se van a contemplar en el automatismo y procede a definir las acciones que llevarian de un estado a otro utilizando las lineas de conexión en la guía. Es importante resaltar que la guía GEMMA establece una filosofía de modularidad y escalabilidad, por lo cual no es necesario tomar en cuenta los dieciséis procedimientos en el primer momento.

- Para poder implementar los estados del GEMMA, hacemos uso de dos técnicas: Ampliación del GRAFCET base o la utilización de GRAFCET's parciales Fig. 10. La primera está orientada a automatización de sistemas pequeños, mientras que la segunda nos permite establecer el control para sistemas de mediana y gran envergadura.

- Por último, realizamos la programación en lenguaje LADDER, utilizando los mismos pasos planteados en la asignatura de automatización avanzada I. Cabe resaltar que en esta asignatura también se incluye la programación básica de pantallas HMI, la cual nos permite contemplar mas entradas relacionada con botones, pulsadores, selectores y mas salidas como indicaciones visuales con parpadeo o cambio de color Fig. 11.

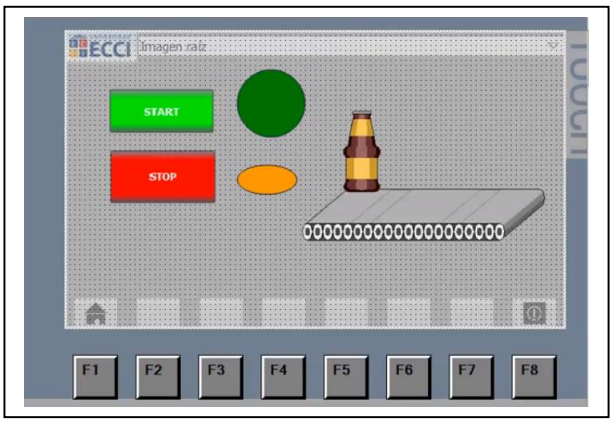


Fig. 11. Diseño de HMI para la utilizacion de entradas por parte del operador en la guia GEMMA

C. Metodologia en Automatizacion avanzada III

- Para el diseño de los diferentes sistemas en automatización de edificios se utilizan bases de edificios encontradas en repositorios de uso libre. El software utilizado es AUTOCAD, el cual nos permite ubicar los diferentes elementos en los planos de cada uno de los pisos. Dependiendo del sistema a diseñar se utilizan diferentes programas de simulacion. Para el caso de la red de WIFI, los estudiantes hacen uso de un software libre para el diseño de cobertura que se trabaja en el navegador web [10]. Y para otros sistemas como el circuito cerrado de televisión, se utiliza versiones demo [11].

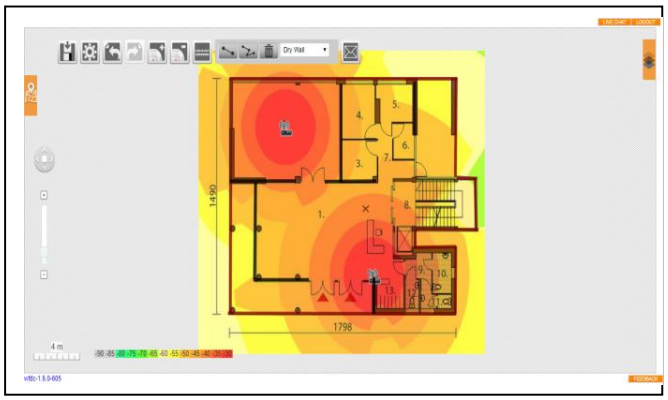


Fig. 12. Diseño y simulacion de red de WIFI

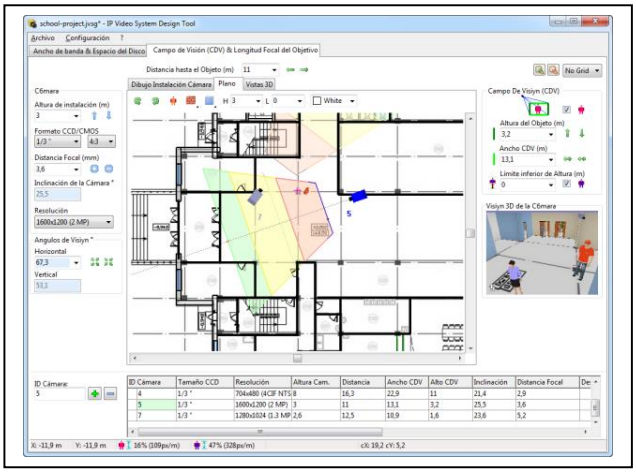


Fig. 13. Diseño y simulacion de CCTV. Tomado de [11]

- Para otros sistemas, como detección de incendios y sistemas de control de acceso e intrusión, las prácticas y clases presenciales están enfocadas a presentar los diferentes tipos de sensores o trasmisores específicos utilizados. Además del tipo de arquitectura y tecnologías que se manejan, ampliando un poco sobre los principios físicos utilizados, y estableciendo métricas de comparación.

- La última parte del curso es la presentación de la norma ISO 50001. Su estructura, alcance y objetivos. Teniendo como presentación preliminar el plan de acción indicativo de eficiencia energética PAI PROURE 2017-2022 [12]. El cual nos presenta un contexto sobre el consumo y uso de energéticos en los sectores donde existen edificios.

- El principal objetivo es presentar las partes de un sistema de gestión de energía, el cual puede ser implementado en procesos industriales, transporte y edificios. Los estudiantes escogen un caso de estudio donde identifican usos significativos de energía y empiezan a formular las actividades para lograr un sistema de gestión de energía SGE.

- Para poder establecer una metodología formal con respecto a la implementación de un SGE, se utiliza el software del departamento de energía de estados unidos [13], el cual contempla todas las etapas para la formulación e implementación que lleve a la organización o a los implementadores a buscar una certificación del sistema.

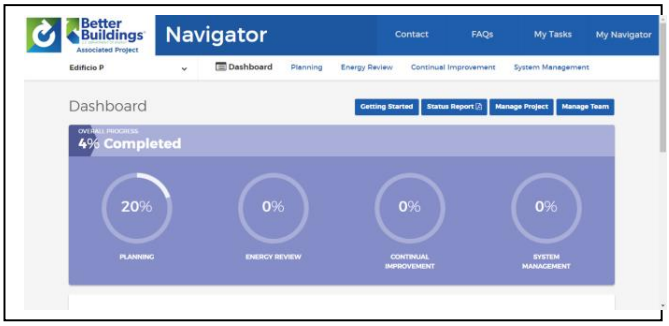


Fig. 14. Software guia para la implementacion de Sistema de gestion de energia SGE bajo la norma ISO 50001[13]

V. RESULTADOS OBTENIDOS Y PROBLEMAS ENCONTRADOS

La línea electiva de automatización avanzada comenzó su oferta en el primer semestre de 2016, hasta el momento las asignaturas han sido muy atractivas para los estudiantes, hemos tenido dos cohortes de la línea y la motivación de los estudiantes es evidente.

En el primer semestre que se oferto la asignatura de automatización avanzada I, se realizo una encuesta de satisfacción a nuestros estudiantes. Con una muestra de 32 personas los resultados mostraron una gran satisfacción de la propuesta: Fig. 15 y 16. Las preguntas realizadas fueron las siguientes:

¿Los formalismos y técnicas vistas en clase son pertinentes para la solución de problemas de mediana y gran envergadura en el area de automatizaciòn?

¿Considera que los formalismos y técnicas vistos en clase complementan temáticas vistas en otros cursos?

¿Cree que la asignatura responde a las necesidades del sector industrial colombiano en la automatización de procesos industriales y de manufactura?

¿Considera que la tecnología de implementacion (PLC Siemens) trabajada en los laboratorios del curso, responde a lo implementado en el sector industrial?

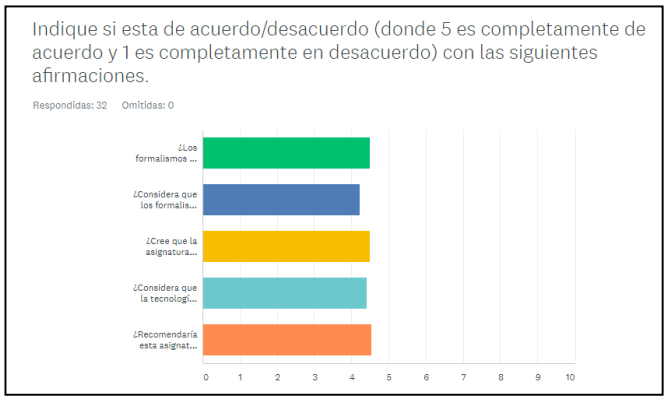


Fig. 15. Resultados de las preguntas realizadas al primer grupo de estudiantes de Automatizacion avanzada I – I-2016

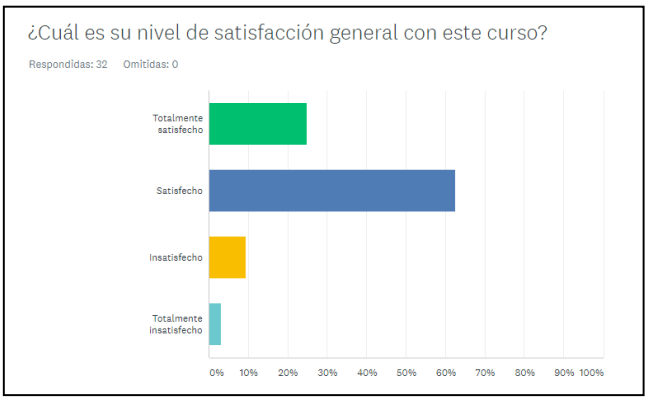


Fig. 16. Resultados encuesta de satisfaccion estudiantes de Automatizacion avanzada I – I-2016

En este momento la línea electiva de automatización avanzada ha logrado posicionarse dentro de la profundización que buscan muchos estudiantes. Se tiene totalmente estructurada en sus contenidos y sus practicas de laboratorios. Automatización avanzada I y II cuenta con sus laboratorios para practicas basados en electroneumática y para este semestre 2018-I la universidad ha realizado una adquisición de una celda de manufactura de seis estaciones, la cual será base importante para nuevos retos dentro de los diseños de los estudiantes.

Con respecto a Automatización Avanzada III, carecemos de un laboratorio para practicas con sistemas de edificios inteligentes, pero se ha empezado a contemplar un diseño que nos permite trabajar el concepto de *BMS (Building Management System)*, donde podamos gestionar, monitorear y controlar diferentes sistemas, a través de un prototipo.

Es importante tener en cuenta que la estructura de la línea electiva obedece a la pertinencia con el sector industrial colombiano, por la tanto el comité curricular del programa de ingeniería electrónica, esta atento a la dinámica sectorial para proponer nuevos temas dentro del contenido o nuevas metodologías que nos permitan tener una carrera actualizada, y pertinente.

REFERENCES

[1] R. David, and H. Alla, “Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets,” Edition 2. France: Springer, 2010.

[2] (2018)”Siemens TIA PORTAL”. [Internet]. Disponible en: http://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/tia-portal/pages/tiaportal.aspx

[3] (2018)”Que es LabVIEW” ”. [Internet]. Disponible en: http://www.ni.com/es-co/shop/labview.html

[4] (2018)”Curso GEMMA”. [Internet]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Gu%C3%ADa_de_estudio_de_los_modos_de_marchas_y_paradas

[5] (2018)”Descripcion general AUTOCAD”. [Internet]. Disponible en: https://latinoamerica.autodesk.com/products/autocad/overview

[6] (2013)”Observatorio Laboral y ocupacional + trabajo SENA”. [Internet]. Disponible en: http://observatorio.sena.edu.co/

[7] S. Wang “Intelligent Buildings and Automation, ” Abingdon/New York:Spon Press, 2010.

[8] (2018)”Time petri Net Analyzer”. [Internet]. Disponible en: http://projects.laas.fr/tina//home.php

[9] (2018)”Conceptos fundamentales GEMMA”. [Internet]. Disponible en: http://olmo.pntic.mec.es/jmarti50/gemma/gemma1.htm

[10] (2018)”Wi-Fi Designer” [Internet]. Disponible en: https://wfd.cloud.xirrus.com/wfdc/

[11] (2018)” JVSG: CCTV Design Software” [Internet]. Disponible en: http://www.jvsg.com/es/

[12] (2017)” Portal UPME/Plan de Acción Indicativo de Eficiencia Energética PAI PROURE 2017 – 2022” [Internet]. Disponible en: http://www1.upme.gov.co/Paginas/Plan-de-Acci%C3%B3n-Indicativo-de-Eficiencia-Energ%C3%A9tica-PAI-PROURE-2017---2022.aspx

[13] (2018)”50001 Ready U.S. DEPARTMENT OF ENERGY” [Internet]. Disponible en: https://navigator.industrialenergytools.com/

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE GUIAS DE LABORATORIO DE UN SISTEMA DE PRUEBA Y MEDICIÓN PARA EL DESARROLLO DE APLICACIONES TELEMÉTRICAS

MSc. Luis Fernando Rico Riveros, MSc. Victor Hugo Bernal Tristancho, MSc. Alexander Cortes Llanos

Universidad ECCI

coordinacion.electronica@ecci.edu.co, acortesll@ecci.edu.co, vbernalt@ecci.edu.co

***Abstract*— A fin de obtener guías de laboratorio mediante una estrategia didáctica basada en aprendizaje colaborativo [1] se presenta el diseño e implementación de un sistema que permite la realización de pruebas y mediciones en forma alámbrica e inalámbrica en aplicaciones telemétricas, obteniendo información a distancia de variables involucradas en procesos de medición y control, como son: velocidad, aceleración, posicionamiento GPS, posicionamiento por Giroscopio, temperatura, presión entre otros, estableciendo el estado y comportamiento de un dispositivo fijo o en movimiento**

***Index Terms*—Didáctica, Diseño, simulación, emulación, telemetría, posicionamiento GPS, RF**

I. INTRODUCCIÓN

Con este diseño se presenta un procedimiento teórico, experimental y práctico para la caracterización e implementación de sensores transductores aplicados a sistemas de telemetría tanto por vía cable como por vía RF, obtener información de variables propias del proceso de medición como son: velocidad, aceleración, posicionamiento, temperatura, presión. Se presenta la utilización y caracterización de hardware y software, tanto básico como especializado, y su consecuente interacción para generar el sistema de prueba y medición correspondiente, esta información se consolida para el desarrollo de guías de laboratorio que son implementadas al interior de asignaturas de pregrado a nivel de tecnología e ingeniería.

El trabajo está orientado hacia una estructura académica como propuesta de desarrollo de guías de laboratorio para ser aplicables en los niveles de formación con estudiantes Tecnología y estudiantes de Ingeniería en diferentes asignaturas propias del área: mediciones, instrumentación, comunicaciones, control, basado en una estrategia metodológica que permita el trabajo de aprendizajes colaborativos, así mismo el objetivo es acercar tanto a los estudiantes de Tecnología e Ingeniería a entornos de medición más reales y aplicados en la industria, tal como son los sistemas DAQ que se explican más adelante.

Para la generación de las guías de laboratorio a nivel tecnológico se diseñó e implemento el sistema basado en hardware y software, siendo compuesto por dispositivos como sensores: termocupla, termistor, celda de carga, módulo GPS con su antena, módulo Giroscopio; como sistema de procesamiento: microcontroladores PIC, tarjeta de microcontrolador Arduino [2], tarjeta NI – USB 6008 [3]; dispositivos de comunicaciones: módulo transmisor de RF, módulo receptor RF; medios de transmisión alámbrica (interfaz RS232) e inalámbrica, en la fig. 1 se presenta una imagen del sistema básico emulado bajo prueba en protoboard, logrado por estudiantes de los semestres cuarto y quinto de Tecnología

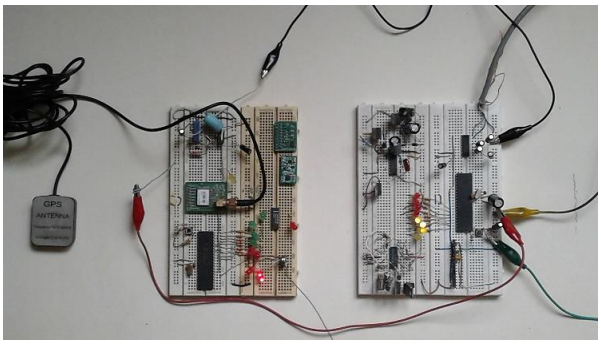


Fig 1. Sistema básico de prueba

Para la generación de guías de laboratorio a nivel de Ingeniería, se trabajó con estudiantes de noveno y décimo semestre al interior de las asignaturas: Instrumentación Industrial I e Instrumentación Industrial II, para lo cual se contó con un sistema de desarrollo tipo CompactDAQ, ver fig. 2, con módulos: de comunicaciones, de entradas analógicas-digitales, de salidas analógicas-digitales, módulo de termocuplas, y software de desarrollo basado en LabView [4].

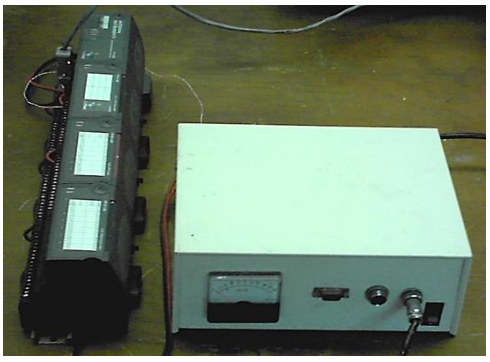


Fig 2. Sistema robusto de prueba

II. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

El diseño e implementación de las guías de laboratorio se sustentan en el seguimiento y cumplimiento de procedimiento metodológico experimental que se organiza por fases: propuesta, diseño, práctica experimental, emulación, simulación, que permite la caracterización e implementación

de sensores transductores aplicados a sistemas de telemetría tanto por vía cable como por vía RF, mediante los cuales permiten obtener información de variables propias del proceso de medición como son: velocidad, aceleración, posicionamiento, temperatura, presión.

III. PROPUESTA

Mediante un proceso lógico y sistemático de diseño e implementación de guías de laboratorio se consolida y tiene a disposición un sistema electrónico de medición, adquisición y visualización de señales de información, provenientes de variables físicas que intervienen en procesos de monitoreo que ocurren en forma remota y a distancia caracterizadas en aplicaciones telemétricas. Tomando como estrategia didáctica el aprendizaje colaborativo, siendo el docente un guía y los estudiantes en grupos de trabajo definidos en roles de participación para llegar a un proceso de evaluación formativa y de esa forma realizar una retroalimentación de las actividades desarrolladas.

Los estudiantes se apoyan mutuamente para cumplir con un doble objetivo: lograr ser expertos en el conocimiento del contenido y desarrollar habilidades de trabajo en equipo. Comparten metas, recursos, logros y entendimiento del rol de cada uno. Son responsables de su desempeño y del logro de la tarea común y evalúan cuales acciones les han sido útiles y cuales no para mejorar su desempeño en un futuro. [5].

IV. DISEÑO EXPERIMENTAL

Dada la necesidad de poder contar con un sistema electrónico para la realización de mediciones, adquisición y visualización de variables físicas que se generan a distancia, se propuso un diseño inicial, tanto de hardware como de software, lográndose un sistema que permitía obtener información de variables, como: temperatura, presión, aceleración, posicionamiento basado en GPS, giroscopio, además de la caracterización de los sensores, se desarrolló una interfaz gráfica basada en la herramienta computacional LabVIEW, con este sistema tanto de hardware como se software se realizaban procesos de simulación y emulación de aplicaciones de orientación en el área de la telemetría.

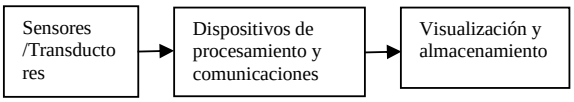
El diseñó se basa en la implementación sistemática de guías de laboratorio en las asignaturas de Instrumentación Industrial de cuarto semestre y Adquisición de Datos de Quinto semestre de Tecnología en Electrónica Industrial de la Universidad ECCI, la secuencia de guías de laboratorio es la siguiente:

En instrumentación Industrial:
1. Caracterización de los sensores:
   Temperatura: termocupla, Termistor
   Presión, Celda de Carga
   Aceleración
   Giroscopio
2. Procesamiento de señales de los sensores:
   Temperatura: termocupla, Termistor
   Presión, Celda de Carga
   Aceleración
   Giroscopio

En Adquisición de Datos:
1. Trabajo con microcontrolador PIC y Arduino
   Conversión analógica – digital
   Interfaz de comunicaciones seriales
2. Visualización para monitoreo con interfaz gráfica:
   Interfaz gráfica desarrollada en LabVIEW
3. Caracterización sistema RF
4. Caracterización GPS con interfaz gráfica

4.1. Diseño y aplicación componentes de Hardware y Software Nivel de formación en Tecnología

Para el diseño del primer sistema de medida, adquisición y monitoreo se implementó por etapas, dichas etapas se pueden visualizar en el siguiente diagrama a bloques:



La etapa de caracterización de los sensores se desarrolló al interior de la asignatura Instrumentación Industrial con estudiantes de cuarto semestre, se trabajó por grupos colaborativos, logrando la caracterización de los siguientes tipos de sensores y módulos, en la fig. 3 se observa alguno de los tipos de sensores de temperatura y presión.

- Sensor de temperatura Termocupla tipo K [5]
- Sensor de temperatura Termistor [6]
- Celda de carga
- Módulo Giroscopio [7]
- Módulo Acelerómetro [8]



Fig. 3. Sensores temperatura y presión

La etapa de dispositivos de procesamiento y comunicaciones se desarrolló al interior de la asignatura Adquisición de Datos con estudiantes de quinto semestre, se trabajó por grupos colaborativos, logrando la caracterización de los siguientes dispositivos de procesamiento y comunicaciones, así como se observa en la fig. 4:

- Tarjeta de adquisición de datos NI – USB 6008
- Tarjeta de adquisición de datos Arduino
- Microcontroladores PIC 18F450
- Transmisor de RF
- Receptor de RF
- Módulo GPS con antena

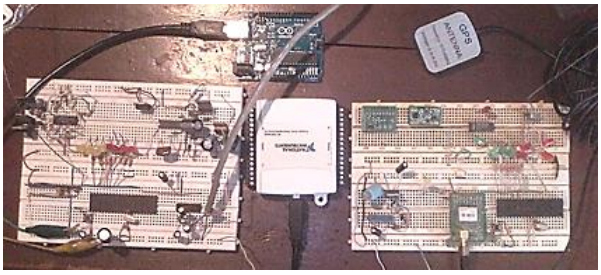


Fig. 4. Dispositivos de procesamiento y comunicaciones

En la fig. 4 se observa en protoboard los circuitos de prueba y desarrollo orientados a la caracterización y logro de prototipo, así mismo los dispositivos utilizados para lograr el sistema de medición, adquisición y almacenamiento propuesto.

4.1.1 Descripción Guía Laboratorio Caracterización GPS con Interfaz Gráfica.

En la figura 5 se presenta un diagrama a bloques del sistema de medición desarrollado, así mismo se realiza una presentación en forma resumida de la guía de laboratorio Caracterización GPS con interfaz gráfica.

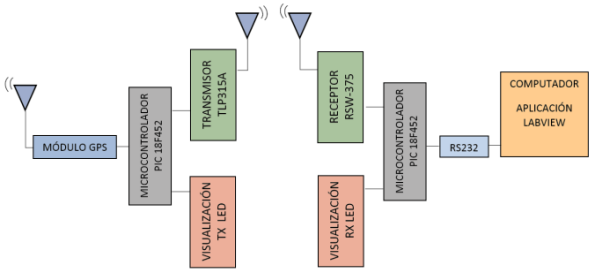


Fig. 5. Diagrama a bloques aplicación posicionamiento con GPS

1. La información de posicionamiento proviene del módulo GPS [9] configurado e instalado con su antena [10].

2. El módulo GPS se conecta al microcontrolador de transmisión PIC 18F452 [11], el cual toma la información y la procesa para ser transmitida por el módulo de RF y visualizada bit a bit por leds.

3. El transmisor TLP315A [12] con antena, envía la información en forma inalámbrica hasta el receptor de RF.

4. El receptor RWS-375 [13], captura la señal de información y la envía al microcontrolador de recepción.

5. El microcontrolador PIC 18F452 de recepción, toma la información la procesa y la transmite vía interfaz RS232 y conversor USB al computador, así mismo la información recibida se puede visualizar bit a bit a través de los leds de recepción configurados para tal fin.

6. La información de posicionamiento obtenida es visualizada a través de la interfaz gráfica desarrollada en LabVIEW siendo adaptada a la aplicación específica, en las figuras 6 y 7, se observa impresión de pantalla del programa utilizado, ilustrando en la fig. 6 el programa de la ventana de diagrama de bloques, y la fig. 7 el panel frontal.

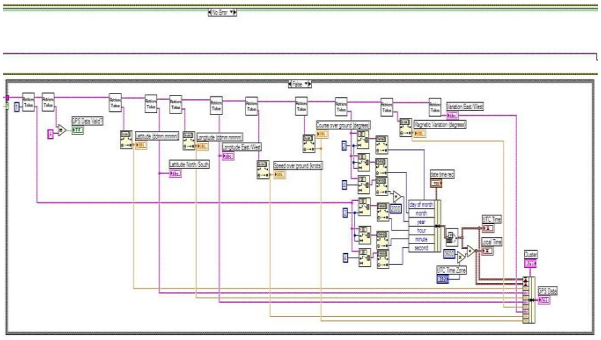


Fig. 6. Ventana Diagrama de bloques en LabVIEW – GPS

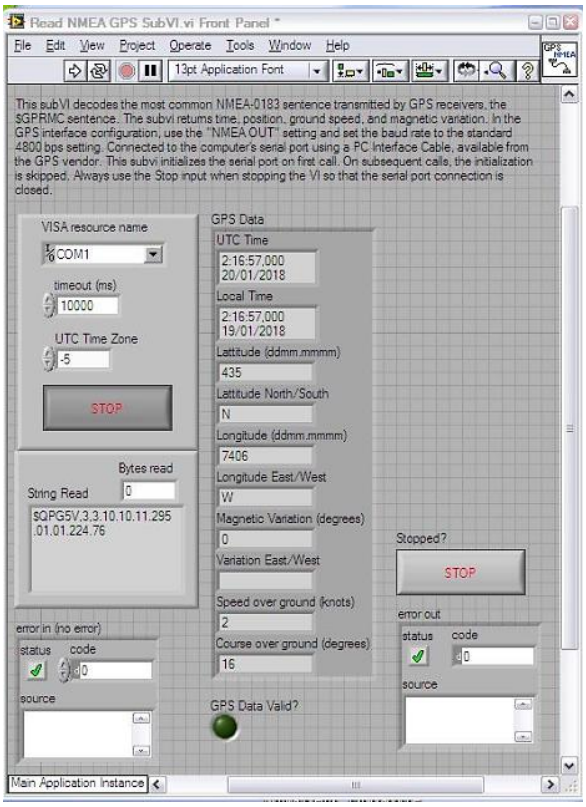


Fig. 7. Ventana panel frontal en LabVIEW – GPS

De las figuras 6 y 7 se observa el desarrollo y adaptación del programa de aplicación con dispositivos de posicionamiento como es el GPS, brindando información de la posición actual del dispositivo, esta información se adquiere codificada aplicando el protocolo NMEA-0703 sentencia transmitida por el GPS y recibida por la interface desarrollada en LabVIEW decodificada por la sentencia %GPRIMC, disponiendo en la interfaz los Sub Virtual Instruments (VI), configurados para brindar información de la fecha, hora, distancia, coordenadas de posicionamiento geográfica del dispositivo, bien sea en estado estático como dinámico.

4.1.2 Descripción Guía Laboratorio variables: temperatura, presión con Interfaz Gráfica

Previa caracterización de los sensores en la asignatura Instrumentación Industrial de cuarto semestre, se procede a realizar el procedimiento para poder visualizar, almacenar y analizar la información, se realiza al interior de la asignatura Adquisición de Datos de quinto semestre.

En la figura 8 se presenta un diagrama a bloques del sistema de medición desarrollado, así mismo se realiza una presentación en forma resumida de la guía de laboratorio variables: temperatura, presión con interfaz gráfica.

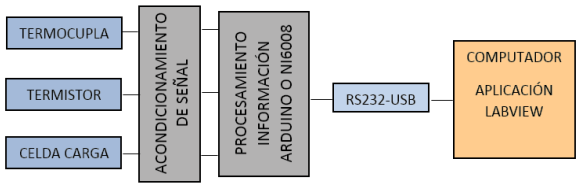


Fig. 8. Diagrama a bloques aplicación variables: Temperatura y Presión

1. Caracterización y acondicionamiento de señal [14] de los sensores: Termocupla [15], termistor y celda de carga.

2. Procesamiento de información: para la práctica y lograr comparación se utilizan dos tipos de dispositivos: Arduino y/o tarjeta NI 6008, en ambos casos el estudiante puede utilizar las librerías particulares disponibles en LabVIEW.

3. Visualización y almacenamiento de información con interfaz gráfica programa de aplicación en LabVIEW desarrollado, en las figuras 9 y 10 se presenta impresión de pantalla del programa de diagrama de bloques y panel frontal respectivamente.

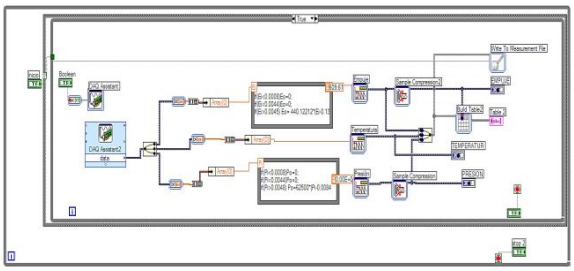


Fig. 9. Ventana Diagrama de bloques en LabVIEW – variables

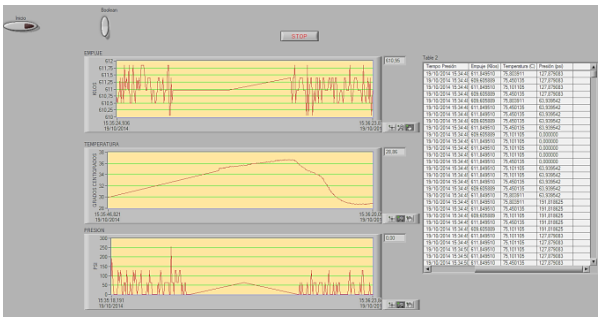


Fig. 10. Ventana panel frontal en LabVIEW - variables

El programa de aplicación presentado en las figuras 7 y 8 se implementó para obtener información de las variables de temperatura con los sensores de Temperatura: Termocupla [16], termistor, y presión: celda de carga [17], en forma simultánea se puede visualizar el comportamiento de cada variable, así mismo se crea un informe en Excel a través del VI correspondiente de generación de informes, dicha información se dispone en Excel para cálculos y análisis correspondiente.

4.1.3 Descripción Guía Laboratorio variables: Conteo, temporización y velocidad con Interfaz Gráfica

Siguiendo el procedimiento aplicado y explicado en las guías anteriores se presenta en la figura 11diagrama a bloques del sistema de medición desarrollado para lograr obtener información de aplicaciones de conteo, temporización y velocidad, se explica en forma resumida el desarrollo de la guía de laboratorio Caracterización variables: conteo, temporización y velocidad con interfaz gráfica.

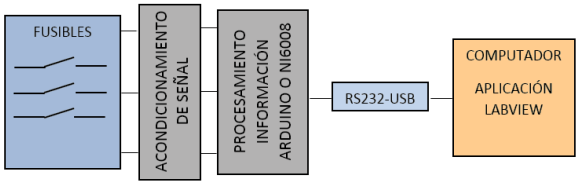


Fig. 11. Diagrama a bloques aplicación: Conteo, Temporización y velocidad

1. Para el caso se cuenta con actuadores que se denominaron fusibles, abren o cierran un circuito de aplicación para contar eventos, los cuales pueden ser temporizados, o aplicados para caracterizar un dispositivo que permite obtener la velocidad de un evento.

2. Procesamiento de información, se configuró las entradas digitales de los dispositivos: Arduino y/o tarjeta NI 6008, en ambos casos el estudiante puede utilizar las librerías particulares disponibles en LabVIEW [18], poder realizar comparaciones entre los dos dispositivos de procesamiento.

3. Visualización y almacenamiento de información con interfaz gráfica con programa de aplicación en LabVIEW desarrollado, en la figura 12 se presenta impresión de pantalla del programa del panel frontal.

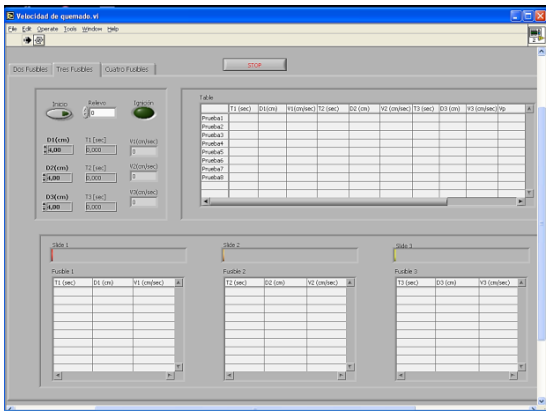


Fig. 12. Ventana panel frontal en LabVIEW - fusibles

En el panel frontal del programa en LabVIEW presentado en la fig. 12, se ilustra una interfaz gráfica compuesta por varios controles, como son: carpetas para hacer pruebas con dos, tres y cuatro fusibles, control para introducir datos iniciales de entrada, como la distancia de separación entre fusibles, el tiempo en segundos, y la velocidad entre cada punto de cada fusible.

Para cada zona de fusibles se ilustra un control gráfico de barra de desplazamiento y tabla de adquisición de información, esto ocurre cuando se está recorriendo determinada zona del evento de conteo y velocidad, así mismo durante la ejecución se pueden visualizar los datos que se están adquiriendo, los cuales son guardados en archivo Excel para su posterior análisis. Se cuenta también con una tabla general, que visualiza y guarda todos los datos de cada una de las zonas de separación entre ejecución de fusible en fusible

4.3. Diseño y aplicación componentes de Hardware y Software Nivel de formación en Ingeniería

Dados los resultados y experiencia adquirida con el sistema de desarrollo de simulación y emulación presentado y explicado en los apartes anteriores, referente a los alcances logrados en el nivel de formación en Tecnología, se procedió a evolucionar las aplicaciones a un sistema más robusto de adquisición de datos tipo DAQ, que se pudiera aplicar y desarrollar en el nivel de formación en Ingeniería Electrónica y que pudiera acercar a los estudiantes de noveno y décimo semestre a entornos más reales e industriales.

Inicialmente se tiene un sistema industrial denominado NI FieldPoint migrando a un sistema NI CompactDAQ [19], dicho sistema consta de módulos intercambiables, configurables y escalables, dependiendo de la complejidad de la aplicación, se distinguen:

1. Módulo de comunicaciones
2. Módulo de entradas analógicas
3. Módulo de relés para activación de cargas de potencia
4. Módulo de señales especializado para sensores de temperatura tipo termocupla.

Con estas características de configuración del sistema se pueden adquirir mayor cantidad de variables en forma simultánea, a mayor distancia de separación, con mayor inmunidad al ruido y protección de la información, con tiempos de procesamiento más regulares y estables, permitiendo tener mayor confiablidad de la información.

4.3.1 Descripción Guías de laboratorio del Hardware utilizado para aplicación de medición de variables

A continuación se presentan una descripción un poco más detallada de las guías de laboratorio de instalación, utilización y aplicación tanto de Hardware como de Software, desarrolladas por estudiantes de noveno y décimo semestre de Ingeniería Electrónica, a través de trabajo colaborativo al interior de las asignaturas Instrumentación Industrial I e Instrumentación Industrial II.

El hardware requerido para las aplicaciones planteadas se diseñó e implementó utilizando los siguientes componentes, tanto de sensores como de procesamiento de señales y comunicaciones, así como se ilustran en la fig. 13.

1. Módulo de comunicaciones Field Point FP – 1000
2. Bases terminales FP-TB-1, FP-TB-3
3. Módulo de entradas análogas FP AI – 100
4. Módulo de entradas análogas de termocuplas FP TC-120
5. Módulo de relevos FP RLY-420
6. Fuente de alimentación de voltaje DC de 12 voltios para alimentar Field Point y celda de carga
7. Batería de 12VDC para circuito de ignición
8. Cable y conector DB9 para interface serial de comunicaciones RS232, para conexión Field Point y computador PC
9. Cables de poder
10. Cables de conexión: fuente de alimentación, cable de ignición
11. Celda de carga
12. Sensor de temperatura
13. Sensor de presión

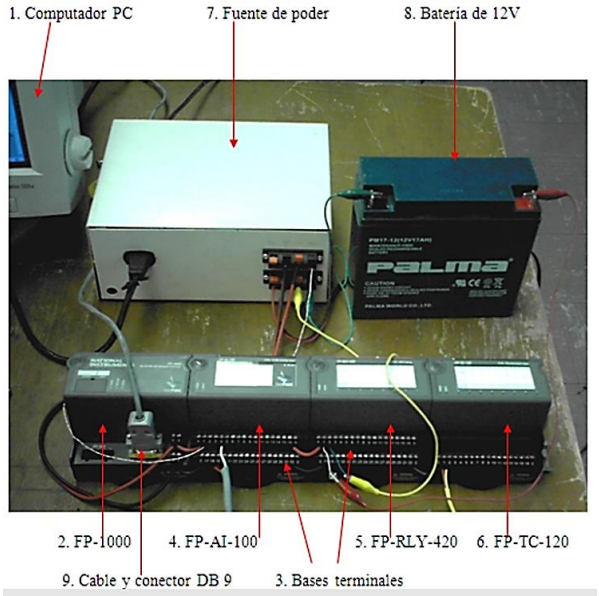


Fig. 13. Conexión módulo FieldPoint

Guía laboratorio: Instalación y conexiones del Field Point con sensores

Se presenta el procedimiento de instalación de los módulos del sistema FieldPoint:

1. Módulo Interfaz de red FP-1000
2. Base terminal FP-TB-1, se conecta al módulo interfaz de red.
3. Módulo de 8 entradas/salidas analógicas I/O FP-100, se instala sobre la base terminal FP-TB-1
4. De la base FP-TB-1 se ensambla la siguiente base de referencia FP-TB-3 para instalar el módulo FP-TC-120, que es el módulo de ocho entradas para señales de termocuplas
5. De la base FP-TP-3 se ensambla la base FP-TB-1 para instalar el módulo FP-RLY-420 que es el módulo de señales de salida de relevos para activación de cargas. Se recomienda este orden de conexión.

6. Para que el sistema FieldPoint funcione requiere estar conectado a una fuente de poder de voltaje de 11 a 30 VDC, la alimentación de voltaje se toma de la fuente de poder. Se conecta a la fuente de poder el módulo de comunicaciones FP-1000, este se identifica como COM o C, para indicar que es el punto común, y extremo rojo del cable se conecta en la parte alta del conector de potencia identificado con la letra V, indica el punto de voltaje más alto, para las pruebas que se realizan se utiliza un voltaje regulado de 12 VDC. De este conector de potencia y a través de cables cortos, que se conectan a los puntos identificados como V y C de la base FP-TB-1 del módulo I/O FP- 100 se distribuye el voltaje de alimentación necesario, en este mismo sentido de la base FP-TB-1 se conecta un solo cable negro a la siguiente base FP-TB-3 al punto identificado como C, y por último se alimenta la base FP-TB-1 del módulo de relevos.

7. La celda de carga tiene un cable de conexión de 10 metros de largo, este cable consta de cuatro cables internos, que se encuentran distribuidos de la siguiente forma: un cable para la alimentación de voltaje positivo (color rojo), un cable de punto común (tierra, color negro), un cable de senseo o salida positiva (color verde) y un cable de senseo o salida negativa (color blanco), esta configuración de cables en el punto extremo se conectan a un circuito de acondicionamiento de señal que consta de un amplificador y un filtro, que permiten procesar y acondicionar la señal de información de la celda de carga. Esta señal procesada es transmitida a través de un cable de conexión a uno de los canales analógicos del módulo de entradas análogas I/O AI FP-100.

8. La conexión de la termocupla tipo K se realiza directamente al módulo FP TC-120, al canal 0 que corresponde a los terminales numerados 1 y 2, al terminal número 1 llega el terminal positivo de la termocupla y al terminal número 2 llega el terminal negativo de termocupla.

9. El sensor de presión se conecta directamente al módulo FP AI-100 al canal 1, terminales número 4, 19 y 20, esta conexión se realiza a través del cable de conexión especializado y caracterizado para el sensor de presión que tiene una longitud de tres metros y consta de tres cables, un cable de color rojo que se conecta al terminal número 19 denominado VSUP, un cable de color blanco que se conecta al terminal número 4 denominado Iin y un cable de color negro que se conecta al terminal número 20 denominado COM o punto común. Este sensor tiene una capacidad de medida de 0 a 1000 psi, generando dentro este rango una señal de corriente de 4 a 20 mA, con lo cual las mediciones que se realizan con este sensor son mediciones de corriente, logrando una configuración denominada loop powered de acuerdo al orden de conexión establecido.

10. El cable para cargas de potencia tiene una longitud de 10 metros, el terminal negativo (color negro) se conecta a un circuito de potencia y protección, conectado así mismo al terminal negativo de la batería externa de 12 Voltios, por medio de la cual se genera la diferencia de potencial y corriente necesarias (12 voltios, 3 Amperios) para realizar la activación de la carga de potencia. El terminal positivo (color rojo) del cable de potencia se conecta al canal 0 terminal número dos del módulo FP RLY-420. El otro extremo del cable de potencia se conecta a la carga que puede ser un alambre de ferro níquel calibre 0.3 el cual cierra el circuito, el alambre de ferro níquel se utiliza para realizar pruebas y mediciones de plena carga, máximo 3 amperios.

10. Las comunicaciones entre el computador y el sistema FieldPoint se realiza a través de la interfaz serial RS232, para lo cual se dispone de un cable de conexión que cumple con la interfaz, así mismo en cada uno de los extremos el cable tiene un conector DB9 (gris) el cual se conecta por un extremo al puerto serial del computador y el otro extremo al módulo de red FP- 1000, permitiendo las comunicaciones bidireccionales de extremo a extremo.

4.3.2 Descripción Guía de laboratorio del software utilizado para aplicación de medición de variables

El programa de aplicación se desarrolló con software LabVIEW, se logró consolidar un programa prototipo de aplicación, que permite realizar la comunicación entre el computador PC y el sistema FieldPoint, adquirir, graficar y almacenar toda la información proveniente del proceso de pruebas de aplicación específica. En la fig. 11 se presenta una imagen del panel frontal del programa implementado.

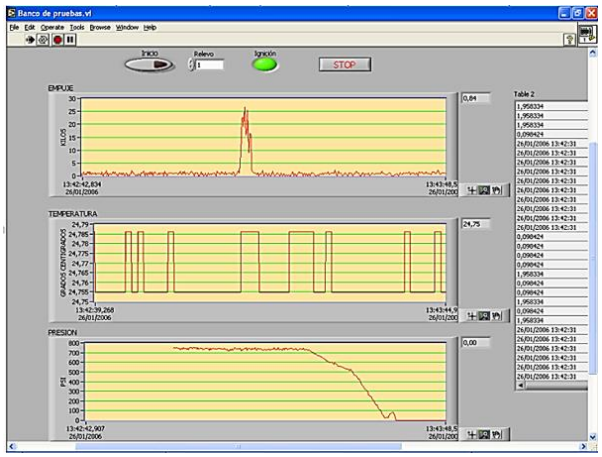


Fig. 11. Ventana principal programa aplicación

En esta ventana se distinguen los siguientes controles:

1. Botón Inicio: al realizar la acción de clic sobre este botón se inicia la adquisición de datos de las señales de la celda de carga, temperatura y presión, esta información se empieza a desplegar en la tabla de datos y sobre las gráficas correspondientes a cada variable.

2. Para activar la carga de potencia (alambre de ferroníquel para pruebas) se realiza la acción de clic sobre el control denominado Relevo, este control inicialmente se encuentra en el valor cero (0), se conmuta a uno (1), enviando la orden al módulo de relevos FP RLY -420 del FieldPoint para que cierre el circuito de potencia, con lo cual conmuta el circuito generando una corriente de 3 amperios sobre el alambre de ferroníquel, lo cual hace elevar el nivel de temperatura de este alambre, se inicia un temporizador de 10 segundos al cabo del cumplimiento de este tiempo se configura una señal para que el canal de relevos pase al estado cero (0), es decir se abre el circuito de potencia por protección desde del computador PC.

3. Control ignición, cuando se da inicio al control relevo, inmediatamente se enciende este control pasando al color verde que indica el inicio del proceso.

4. Control Tabla de datos: sobre este control se visualiza mediante datos numéricos toda la información cada milisegundo, del proceso de medición de peso con celda de carga, temperatura, presión proveniente del sistema FieldPoint. Después de terminado el proceso, y cerrando la aplicación se genera automáticamente un archivo de información de toda la prueba, con datos, fecha y hora, para ser revisado posteriormente en formato de hoja de cálculo Excel

5. Control gráfica Empuje: sobre este control gráfico se visualiza cada milisegundo el comportamiento de la señal de la celda de carga, que relaciona las variables Kilos vs Tiempo.

6. Control gráfica Temperatura: sobre este control gráfico se visualiza cada milisegundo el comportamiento de la señal de la termocupla, que relaciona las variables Grados Centígrados vs Tiempo.

7. Control gráfica Presión: sobre este control gráfico se visualiza cada milisegundo el comportamiento de la señal del sensor de presión, que relaciona las variables psi vs Tiempo. Libras por pulgada cuadrada (psi)

8. Botón STOP: al realizar la acción de clic sobre este botón se envía la orden de detener la adquisición de datos.

9. Para salir de la aplicación se realiza la acción de clic sobre el control X de la ventana en el extremo superior derecho.

Guía Laboratorio: Aplicación fusibles

Para implementar la aplicación denominada fusibles se utilizan los siguientes dispositivos:

1. Módulo de comunicaciones Field Point FP – 1000
2. Bases terminales FP-TB-1, FP-TB-3
3. Módulo de entradas analógicas FP AI – 100
4. Módulo de relevos FP RLY-420
5. Fuente de alimentación de voltaje DC de 12 voltios para alimentar Field Point
6. Batería de 12VDC para circuito de ignición
7. Cable y conector DB9 para interface serial de comunicaciones RS232, para conexión Field Point y computador PC
8. Cables de poder
9. Cables de conexión: fuente de alimentación, cable de ignición

Operación del software aplicación fusibles

1. Carpetas Dos, Tres Fusibles. A través de este control se puede seleccionar si se quiere realizar la prueba con Dos, o Tres fusibles. Generalmente la aplicación se realiza con tres fusibles, para lo cual se da clic en la carpeta nombrada Tres Fusibles.

2. Control Relevo. Este control inicialmente tiene un valor de cero, para iniciar la aplicación se debe colocar a un valor de uno (1).

3. Botón Inicio. Después de colocar el control Relevo en uno, se da clic en este botón Inicio, al realizar esta operación se envía la orden a través del programa al sistema FieldPoint, específicamente al módulo de relevos FP RLY-420 canal cero, se da la orden para cerrar el circuito de potencia donde se tiene la carga correspondiente, para el caso se usa la misma carga de pruebas, como es el alambre de ferroníquel, posteriormente se hace adquiere señal de cierre para cada fusible configurado a través de tres canales analógicos del módulo FP AI – 100, para el caso de simulación y emulación se hace contacto en forma manual cerrando el circuito con una señal de 5 voltios proveniente de la fuente de alimentación, en la fig. 12 se observa el proceso en forma emulada.

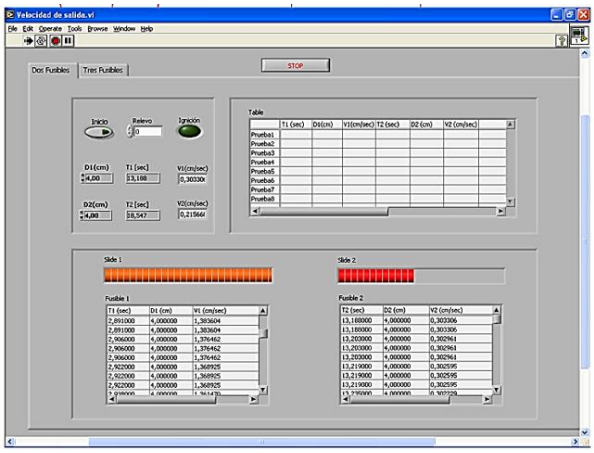


Fig. 12. Panel frontal del programa fusibles en forma emulada

V. RESULTADOS

Se presenta una serie de tablas de resultados obtenidas al realizar los procedimientos descritos en las guías donde se piden obtener resultados, tabularlos, graficarlos y analizarlos, haciendo parte del cuerpo de los informes que deben presentar los estudiantes.

Aplicación Celda de Carga

Ejemplo aplicación peso con la celda de carga (tabla No. 1), utilizando el sistema de medición, adquisición y monitoreo basado en el sistema FieldPoint y software de aplicación LabVIEW.

Tabla No. 1 Pruebas Celda de carga con todo el sistema amplificación, filtrado, Field Point y LabVIEW

PESO	MEDICION 1 (mV)		MEDICION 2 (mV)		MEDICION 3 (mV)		PROMEDIO (mV)		PROMEDIO TOTAL
	Ascendente	Descendente	Ascendente	Descendente	Ascendente	Descendente	Ascendente	Descendente	mV
Sin peso	136	136	136	136	136	136	136	136	136
+ Peso Agarradera	180	181	181	181	181	181	181	181	181
+ Pesa 1 20Kg	229	229	230	230	230	230	230	230	230
+ Pesa 2 20Kg	276	278	275	276	276	279	275.6	277.6	276.6
+ Pesa 3 20Kg	323	323	323	323	323	324	323	323	323
+ Pesa 4 20Kg	370	370	370	370	370	370	370	370	370

Como análisis y conclusión de la tabla No.1, el sistema de adquisición de datos Field Point con el módulo de señales de entrada análogas FP – AI – 100 se puede configurar para diferentes niveles de señal tanto de voltaje como de corriente, para este caso se configuró una entrada análoga con un rango de voltaje de 0V a 6V, para recibir la señal procesada de la celda de carga, para las mediciones que se esperan realizar este rango de voltaje es suficiente con lo cual la etapa amplificadora no necesita mayor porcentaje de amplificación.

Aplicación Temperatura

La tabla No. 2 muestra cinco mediciones partiendo de un valor de temperatura mínimo promedio de 19.33º C (temperatura ambiente, mediciones realizadas entre 13:38 horas y las 14:34 horas del mismo día), se obtiene una variación de temperatura hasta 250º C en tiempo promedio de 121,4 segundos es decir un poco más de dos minutos se demora la termocupla en variar de un valor de temperatura ambiente a un valor máximo de 250º C, con lo cual se obtiene una variación promedio de 1.898º C por segundo en forma ascendente, en forma descendente se demora un tiempo mayor partiendo de 250º C a temperatura ambiente promedio de 19.602º C, demorándose 612 segundos en promedio es decir un poco más de 10 minutos en descender la temperatura de un valor máximo 250º C a temperatura ambiente, se logra una variación promedio de 0.376º C por segundo.

Tabla No. 2. Mediciones de temperatura en forma ascendente y descendente

	ASCENDENTE				DESCENDENTE			
	T.emp. Mínima	Temp. Máxima	Tiempo segundos	Variación º C /S	T.emp. Máxima	Temp. Mínima	Tiempo segundos	Variación º C /S
MEDICION 1	19º C	250º C	114	2.02	250º C	19º C	660	0.35
MEDICION 2	19.5º C	250º C	120	1.92	250º C	20.49º	600	0.3825
MEDICION 3	20.30º	250º C	120	1.91	250º C	20.37º	600	0.3827
MEDICION 4	19.40º	250º C	127	1.81	250º C	19.15º	600	0.3847
MEDICION 5	18.47º	250º C	126	1.83	250º C	19º	600	0.385
PROMEDIO	19.33º	250º C	121.4	1.898	250º C	19.602	612	0.376

Como conclusión de estas mediciones, la señal de voltaje proveniente de la termocupla no necesita un acondicionamiento externo, ya que el módulo de Field Point de señal de termocupla FP- TC – 120 viene totalmente con el acondicionamiento necesario para este tipo de señales, lo cual facilita su implementación, si se requiere un ajuste se puede realizar sobre el programa de aplicación.

Aplicación sensor de presión

La tabla No. 3 presenta la información consolidada de un proceso de medición de presión con el sensor Bourdon HAENNI, se crearon condiciones de medida para lograr la caracterización, para las condiciones de medida se dispuso de una bala de nitrógeno con su respectivo manómetro, el cual sirvió como dispositivo de medición patrón, se generó una data del resultado de la experimentación, logrando repetibilidad en forma ascendente y forma descendente, facilitando el procedimiento de caracterización y de obtención de resultados muy confiables.

Tabla No. 3. Mediciones de presión en forma ascendente y descendente

Presión toma de aire (psi)	MEDICION 1		MEDICION 2		MEDICION 3		MEDICION 4		MEDICION 5	
	Ascendente mA	Descendente mA	Ascendente mA	Descendente mA	Ascendente mA	Descendente mA	Ascendente mA	Descendente mA	Ascendente mA	Descendente mA
0 psi	3.99	4.005	3.975	3.980	3.980	3.980	3.980	3.980	3.980	3.975
10 psi	4.135	4.135	4.165	4.145	4.165	4.295	4.160	4.140	4.155	4.140
20 psi	4.292	4.275	4.317	4.305	4.325	4.465	4.325	4.295	4.315	4.292
30 psi	4.425	4.425	4.477	4.470	4.475	4.617	4.477	4.465	4.475	4.455
40 psi	4.575	4.565	4.642	4.625	4.645	4.617	4.630	4.625	4.652	4.625
50 psi	4.710	4.710	4.805	4.795	4.805	4.780	4.800	4.800	4.805	4.795
60 psi	4.860	4.845	4.965	4.950	4.975	4.950	4.972	4.955	4.965	4.945
70 psi	5.005	4.995	5.130	5.140	5.130	5.125	5.125	5.140	5.135	5.137
80 psi	5.150	5.135	5.295	5.285	5.295	5.275	5.300	5.280	5.305	5.280
90 psi	5.285	5.285	5.450	5.450	5.465	5.435	5.460	5.465	5.470	5.445

VI. CONCLUSIONES

1. Se logró la integración y trabajo colaborativo entre estudiantes de diferentes semestres y niveles de formación para obtener un sistema de medición, visualización y análisis, que les brinda el acercamiento a procesos de medición de variables reales en aplicaciones industriales donde los estudiantes se enfrentaran en el desarrollo de su trabajo como tecnólogos o ingenieros.
2. Se logró el diseño e implementación de un sistema de prueba y medición vía RF, emulado, simulado y aplicado básicamente a la obtención de información de posicionamiento utilizando módulo de GPS.
3. Se logró el diseño e implementación de un sistema prototipo emulado de prueba y medición vía RF de variables de: Temperatura, presión, posicionamiento, pudiéndose adicionar más variables que contribuyen a aplicaciones telemétricas.
4. Con este diseño se presentan una serie de guías de laboratorio con alcance a nivel de formación en tecnología e Ingeniería, logrando trabajo colaborativo.
5. Con esta serie de pruebas con los dispositivos, equipos de hardware y software desarrollado e implementado se puede realizar todo un proceso de simulación y emulación de los procesos a la temática específica de telemetría.

VI. REFERENCIAS

[1] Aprendizaje Colaborativo, técnicas didácticas. Obtenido http://www.itesca.edu.mx/documentos/desarrollo_academico/metodo_aprendizaje_colaborativo.pdf
[2] (2018) https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3
[3] (2018) http://www.ni.com/pdf/manuals/371303n.pdf
[4] (2018)" Que es LabVIEW". [Internet]. Disponible en: http://www.ni.com/es-co/shop/labview.html
[5] (2016) Termokew, Termopares. Obtenido de http://www.termokew.mx/termopares.php
[6](2017)http://www.te.com/usaen/products/brands/meas.html?tab=pgp-story
[7] (2018) https://www.adafruit.com/product/1032
[8](2018)https://es.aliexpress.com/store/product/MMA7361-Angle-Sensor-Inclination-Accelerometer-Acceleration-Module-For-Arduino/2778022_32796149134.html
[9](2018)https://www.sigmaelectronica.net/manuals/Tarjeta_L26.pdf
[10](2018)https://www.sigmaelectronica.net/producto/antenagps-sma/
[11](2018)http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39564c.pdf
[12](2018)https://www.sigmaelectronica.net/manuals/TLP315A.pdf
[13] (2018) http://www.kowatec.com/prod/wen/doc/RWS-375.pdf
[14] (2005 Pallas, R. Sensores y acondicionadores de señal. Sevilla, España: Marcombo,
[15] (2016) National Instruments, Cómo realizar una Medición con un termopar.
[16] (2017) http://www.ni.com/white-paper/7108/es/
[17] (2010) Creus, A. Instrumentación Industrial. México: Alfaomega.
[18] (2011) Lajara, José. Labview entorno gráfico de programación. Alfaomega.
[19](2018) http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/1199

Sistema de adquisición de datos y control industrial basado en Arduino Due con hardware y software libre

Gustavo Ernesto Real
Universidad Nacional de General Sarmiento - UNGS
Los Polvorines, Argentina
greal@ungs.edu.ar

María Florencia Jauré
Universidad Nacional de General Sarmiento - UNGS
Los Polvorines, Argentina
fjaure@campus.ungs.edu.ar

Amado Osvaldo Vitali
Universidad Nacional de General Sarmiento - UNGS
Los Polvorines, Argentina
avitali@ungs.edu.ar

Resumen*—Diversos requerimientos de automatización de procesos, realizados por investigadores y estudiantes universitarios, alentaron el diseño y desarrollo de una placa de adquisición de datos y control, con aplicación en automatizaciones y mediciones en laboratorios educativos y en entornos industriales, basado en software y hardware libre. En este trabajo se detalla el desarrollo realizado para dar respuesta a este requerimiento. Inicialmente, se presentan los distintos elementos constitutivos del sistema, el cual se diseñó centrado en la plataforma Arduino Due; posteriormente se profundiza en la descripción funcional de los mismos y, finalmente, se describen las pruebas iniciales realizadas sobre la placa de prueba. Estas evidenciaron el funcionamiento de los principales componentes, como así también, la necesidad de continuar trabajando con la placa prototipo definitivas para alcanzar los resultados esperados y, así, comprobar todas las interacciones de los componentes en su versión final.

***Palabras clave*—adquisición de datos, lazo de control, automatización industrial, hardware abierto, software libre**

I. INTRODUCCIÓN

A finales de 2015, este grupo de trabajo logró consolidar un sistema de adquisición de datos (SAD) diseñado para ser utilizado como herramienta didáctica en Laboratorios de Ciencias e Ingeniería de la Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS), basado en software y hardware libre [1]. Satisfactoriamente, este sistema se incluyó en el equipamiento de diversos trabajos desarrollados por estudiantes e investigadores de la UNGS, por ejemplo: (1) se utilizó para realizar el control de un seguidor solar instalado en una parábola para generación de energía eléctrica; (2) se incorporó en el sistema de automatización de una planta de compostaje desarrollado por estudiantes de esta casa de estudios; (3) se incluyó en diversos usos didácticos, particularmente, se utiliza en las prácticas habituales de la tecnicatura en automatización de la UNGS.

Sin embargo, teniendo en consideración numerosos requerimientos de distintos equipos de investigación y de estudiantes, se consideró necesario incrementar las prestaciones de este primer desarrollo ya mencionado.

De esta forma, el nuevo SAD, que aquí se presenta, continuará con su esencia de ser de diseño y uso libre -tanto sus componentes de software como de hardware, siguiendo la tendencia global de uso abierto [2][3]-, con el valor agregado de brindar mayores prestaciones, integrando la solución a una importante comunidad de usuarios y maximizando la posibilidad de intercambio y colaboración con pares de otras universidades y latitudes, abarcando distintos campos de investigación. Esta placa les posibilitará a los estudiantes universitarios incorporar conocimientos sobre microcontroladores de 32 bits a través de una aplicación práctica y concreta, tanto para uso en adquisición de datos, como en control.

Otro factor que estimula la continuidad en el desarrollo de diseños propios, teniendo en cuenta la experiencia ya realizada, es saber que ante cualquier problemática que presente el sistema o la necesidad de hacer algún cambio, se tiene el conocimiento y las herramientas para poder continuar, sin la necesidad y/o dependencia de empresas cuyo soporte técnico, muchas veces en Argentina, no se encuentra a la altura de las circunstancias.

El desarrollo del sistema está centrado en la utilización de la Plataforma Arduino Due [4], justificada esta decisión por su amplio desarrollo, estabilidad y disponibilidad de información. De esta forma, la incorporación fundamental, respecto al desarrollo previo, lo establece el uso de un microcontrolador de mayor poder de procesamiento. Esto, a su vez, permite disponer de una mayor cantidad de canales de entradas y salidas y, fundamentalmente, orientar el diseño a la medición y automatización industrial.

II. ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN DEL SISTEMA

Brevemente, el sistema consiste en un dispositivo de hardware -basado en un microcontrolador de 32 bits [5] (Arduino Due)-, el firmware que se ejecuta en el mismo, el conjunto de sensores o adaptadores de señal que transforman las magnitudes físicas de interés en tensiones eléctricas adecuadas y un software de computadora que se comunica con el dispositivo para configurarlo y obtener los datos de las mediciones, visualizando y almacenando sus

valores. También se prevé la comunicación del sistema con centrales de automatización a través de buses estándar. En la Fig. 1 se puede observar el esquema conceptual del sistema.

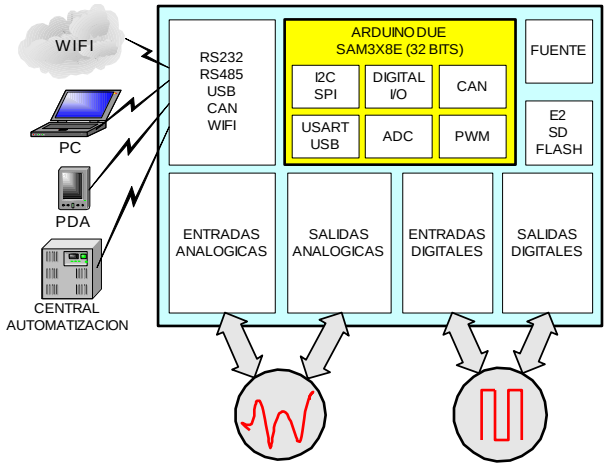


Fig. 1. Esquema conceptual del sistema

A continuación se describen con mayor detalle estos elementos.

A. *Especificaciones*

Dado que el desarrollo de este proyecto persigue dar soluciones o respuestas a las necesidades de la automatización industrial, la definición de los requerimientos para el hardware del sistema de adquisición de datos y control basado en Arduino Due se realizaron en función de esta premisa.

Por esta razón, esta solución provee de salidas analógicas que se utilizan para los lazos de control, ya que permite la modificación en forma continua -dentro del rango de las especificaciones- de dos actuadores que pueden intervenir en sendos lazos. Las entradas y salidas analógicas están entre 0-10 volts o 4-20 mA, seleccionable por el usuario. También se diseñó con buses RS485 y RS232 y comunicación WiFi; aspecto este último que no se orienta directamente a la automatización, pero sí provee de otras posibilidades al desarrollo. Por último, para ampliar los alcances del uso del sistema, se incluyó la comunicación CAN posibilitando, de esta forma, la vinculación con controles en el sector automotriz. Fundamentalmente, el microcontrolador de 32 bits facilita una gran variedad de prestaciones y un gran poder de procesamiento.

Habiendo ya analizado los aspectos generales del sistema desarrollado, a continuación se detallan los componentes utilizados en el hardware del sistema y sus respectivas especificaciones técnicas:

- PCB (Placa de circuito impreso)
  - Montaje superficial
  - Cuatro capas
  - Material constitutivo: FR4
- Salidas
  - Cuatro salidas a relé – 24V @ 1A
  - Cuatro salidas Open Drain – 24V @ 0.5A
  - Cuatro salidas PWM – 0 a 3,3V @ 10mA
  - Dos salidas analógicas (DAC) – 0 a 10V - 0 a 20mA, seleccionable por jumper
- Entradas
  - Ocho entradas digitales optoacopladas – 0 a 24V
  - Ocho entradas analógicas (*single ended*) – 0 a 10V - 0 a 20mA, seleccionable con *jumpers*
  - Cuatro entradas analógicas de instrumentación para mediciones especiales – 0 a 3.3V @ .5mA, ganancia programable por programa
- Buses
  - Bus I2C, SPI, GPIO genérica (por ejemplo: para 1-wire, interrupciones y *triggers*)
- Comunicación
  - RS485
  - RS232
  - Serial USB (por placa Arduino Due)
  - CAN
  - Conector para placa de WiFi (basada en ESP8266)
- Almacenamiento
  - Conector para memoria SD
  - Memoria EEPROM (I2C)
  - Memoria Flash (SPI)
- RTC
  - Por I2C con pila de litio
- Frecuencia máxima de muestreo
  - 52 us @ 12 bits. Cada 52 us se muestran todos los canales elegidos
- Alimentación
  - Entrada por transformador: 9Vac+9Vac - 40VA
  - Entrada en contínua: 15Vdc - 40VA

B. *Diseño de la arquitectura*

El diseño de la arquitectura implica, específicamente, la definición del funcionamiento de la solución. Analizando los objetivos y el marco del proyecto existían distintas opciones de diseño, sin embargo, teniendo en consideración las especificaciones iniciales ya detalladas, se consideró

pertinente que la solución realice parte de sus tareas de forma autónoma y otra parte que las realice conectado a otro equipamiento (por ejemplo: una PC, central de automatización, etcétera).

Como parte del análisis inicial de la arquitectura del hardware existían dos posibilidades: realizar un diseño modular o un diseño integrado[1]. Si bien la modularidad podría simplificar cada placa en sí, al necesitar más conectores se podría incrementar los posibles puntos de fallas del sistema. Asimismo, como la placa está pensada para automatización, con una cantidad suficiente de entradas, salidas y comunicación, se llegó a la conclusión de avanzar por un diseño de tipo monolítico.

Definidas estas primeras características, se completó la arquitectura del sistema, la cual incluye los siguientes elementos de diseño:

a) Diseño de hardware – Esquemático y PCB

El diseño del hardware se inició con el trazado del circuito esquemático (Fig. 2).

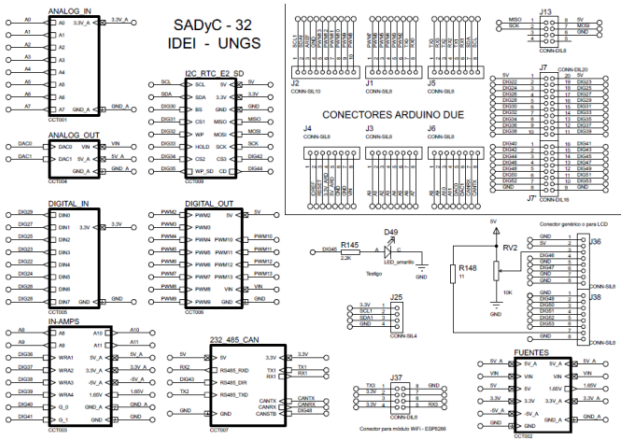


Fig. 2. Representación del circuito esquemático [6]

Pasando al diseño del PCB, inicialmente, se pensó en organizar todos los requerimientos en una placa de dos capas. Sin embargo, luego de desarrollar un diseño preliminar y de revisarlo en forma conjunta con el proveedor de circuitos impresos[7], se concluyó que la placa debía ser diseñada con cuatro capas.

En esta instancia, resulta importante indicar que el desarrollo de la placa correspondiente al sistema de control y adquisición de datos requirió el contacto con varios proveedores que realizaron o realizarán distintas tareas en el proceso de fabricación y armado de la placa prototipo definitiva. Se realizaron intercambios con proveedores para: (1) la fabricación de las placas [7], (2) la adquisición de los componentes necesarios [8] y, por último, (3) el armado de la misma. En este sentido, dado que la placa es de montaje superficial y que para realizar dicho montaje se requiere de un *expertise* diferenciado, se decidió que el montaje de los componentes sea realizado por un proveedor externo [9].

Cabe destacar que el desarrollo del proyecto sufrió alguna dificultad debido al retraso en la entrega de componentes provenientes del exterior del país. Por esta razón, y para evitar la demora de las subtareas sucesivas planteadas en el cronograma inicial, se trabajó sobre una placa experimental de la firma Mikroelectronika [10], adaptando la placa Arduino a la misma, tanto en lo que respecta a la alimentación como a la señalización. Esto posibilitó la prueba de los módulos de firmware de la memoria SD, del reloj, de algunas entradas y salidas digitales, de la comunicación RS232, de la comunicación USB y de los módulos de registro. En lo que respecta a las pruebas de las entradas digitales, se utilizó otra placa de prueba confeccionada por este equipo de trabajo.

Una representación de lo que será la placa cuando esté terminada se puede observar en las Fig. 3 y Fig. 4, las cuales muestran las vistas superior y posterior, respectivamente, de la placa impresa con todos sus componentes posicionados.

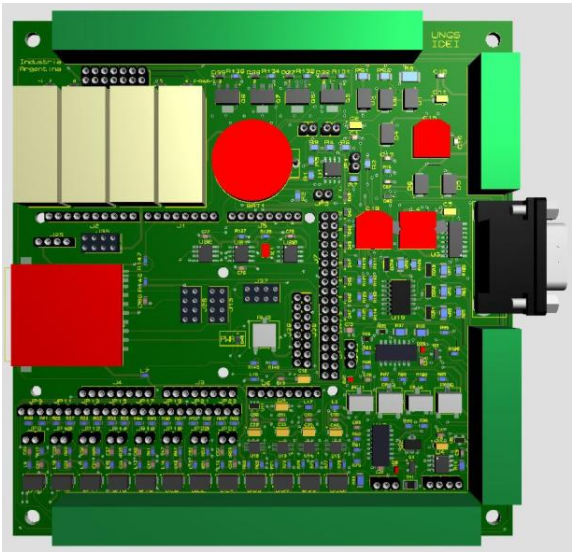


Fig. 3. TopView de PCB

[1] Se debe tener en consideración que firmas internacionales muy reconocidas en el mercado desarrollan versiones con ambos criterios: versiones modulares y monolíticas.

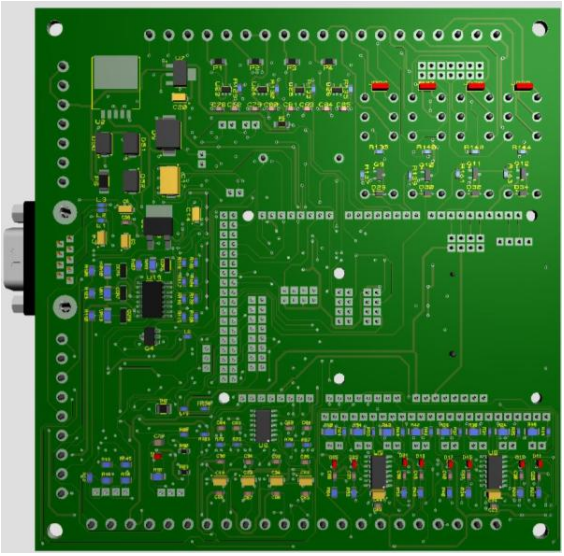


Fig. 4. BottomView de PCB

b) Versionado de firmware y software

En forma paralela a las tareas antes mencionadas, se realizó el seguimiento del desarrollo a través del uso de la herramienta Github [6] para realizar el versionado del firmware y software. El cual constituye una herramienta que permite la revisión sistemática de la evolución de estos elemento,s a medida que se van desarrollando.

c) Firmware

A los efectos de simplificar el uso de la placa se decidió que la placa se comunique hacia los periféricos a través de comandos. Cada comando responde a una comunicación específica, sin embargo, todos ellos se estructuran de la misma forma, logrando un cierto grado de estandarización, facilitando el agregado o eliminación de los mismos. De acuerdo a estas especificaciones, se definió como formato genérico de los comandos lo que se detalla a continuación en la Tabla I.

TABLA I. COMANDOS GENÉRICOS

Formato genérico del comando	
Esc	Atención
Carácter o número	Tipo de comando
Data	Datos del comando

De esta forma, no solo se logra una comunicación concreta y versátil, sino que cualquier especificación adicional que se quiera incorporar y que implique una relación con los periféricos, se podrá realizar de la misma forma, estandarizando así toda la comunicación presente y futura.

Al día de hoy, los comandos definidos para toda la comunicación se encuentran especificados en la Tabla II.

TABLA II. COMANDOS

1.- //Test de los chips de EEPROM instalados -(ESC 1 Valor CR) - Valor => 0 a 255
2.- //Test de la comunicación RS232 - (ESC 2 Char CR) - Char => cualquier carácter ASCII
A.- //Recibe cantidad de canales analógicos - (ESC A Cantidad CR) - Cantidad => 1 a 8
B.- //Recibe cantidad de canales analógicos tipo inAmp - (ESC B Cantidad CR) - Cantidad => 1 a 4
C.- //Seteo de la amplificación de los inAmp - (ESC C Entrada Amplificación CR) - Entrada => 09 a 12 - Amplificación => 0 a 3
D.- //Medición de tiempo entre eventos - (ESC D Pin1 Pin2 CR) - Pin1 y Pin2 => patas válidas, puede ser la misma. Patas válidas: 49, 50, 51, 52, 53 || Devuelve medición en ASCII en microsegundos (variable Long)
E.- //Recibe el modo de trabajo del equipo - (ESC E Modo CR) - Modo => 1 a 5
F.- //Borrado EEPROM - (ESC F CR)
H.-//Seteo del reloj de tiempo real por I2c - (ESC H hhmmssDDMMAAAA CR)
M.- //Generación de PWM - (ESC M Pin Duty CR) - Pin => 02 al 13 - Duty => 0000 a 4095
N.- //Generación de señales analógicas en DACs - (ESC N Pin Steps CR) - Pin => 00 al 01 - Steps => 0000 a 4095
O.- //Transmite datos de un archivo en memoria SD - (ESC O Archivo CR) - Archivo en formato --> 15.3 máximo
P.- //Parada de los modos del equipo - (ESC P CR)
Q.- //Graba un dato fijo en un archivo en memoria SD - (ESC Q Archivo CR) - Archivo en formato --> 15.3 máximo
R.- //Registro temporizado de los canales analógicos seteados - (ESC R Tiempo CR) - Tiempo => 1 a 3600 segundos
S.- //Seteo de la salida digital - (ESC S Salida Estado CR) - Salida => 02 a 09 - Estado 0 o 1
T.- //Transmisión temporizada de los canales analógicos seteados - (ESC T Tiempo CR) - Tiempo => 1 a 10000000 microsegundos || Tiempo=0 -> una transmisión
(En los datos analógicos se transmite primero el byte alto y luego el bajo)
U.- //Transmisión de los canales digitales de entrada en un solo byte binario - (ESC U CR)
W.- //Seteo de Red y Password para WiFi - (ESC W Red 0xFF Pass 0xFF CR) - Red y Pass máximo 15 caracteres ASCII
d.- //Descarga de datos desde la EEPROM - (ESC d CR)
e.- //Transmite datos del equipo –(ESC e CR) - Responde con los datos básicos del proyecto
h.- //Transmite día y hora del RTC - (ESC h CR) - Responde con día y hora del equipo

Ref.: ESC → Escape (0x1b)
CR → Carriage Return (0x0d)

En cuanto al funcionamiento, la placa trabaja por modos. Esto está directamente asociado con cada una de las prestaciones que dispone, de acuerdo con la medición y/o control que se quiera realizar. Dichos modos son mutuamente excluyentes.

En este sentido, se definió que la placa puede trabajar en los siguientes tres modos:

- Adquisición de datos **(ADQ)**
- Automatización **(AUI)**
- Medición de Tiempos **(MDT)**

Resulta importante tener en consideración que se deberá detener el modo de trabajo en curso para poder iniciar cualquier otro modo.

A continuación, en la TABLA III, se especifica el detalle de los modos de trabajo.

TABLA III. MODOS DE TRABAJO

Especificaciones básicas por modo	Descripción por modo
ADQ1 "On Line" (Modo 1): - Canales Analógicos de entrada - Máximo 8 - Canales Digitales de entrada - Máximo 8	La placa será consultada en tiempo real vía el canal de comunicación disponible (ej: RS232), acerca del estado de los canales analógicos y digitales elegidos al momento de configurar la medición.
ADQ1 "Registro" (Modo 2): - Canales Analógicos de entrada - Máximo 8 - Canales Digitales de entrada - Máximo 8	La placa registrará en alguna de las memorias disponibles el estado de los canales analógicos y digitales elegidos al momento de configurar la medición. En el instante en que se lo requiera, vía el canal de comunicación elegido, se podrán descargar los datos de la medición registrados y realizar el procesamiento correspondiente.
ADQ2 "On Line" (Modo 3): - Canales Analógicos de entrada - Máximo 4 - Tipo instrumentación	La placa será consultada en tiempo real vía el canal de comunicación disponible (ej: RS232), acerca del estado de los canales analógicos y digitales elegidos al momento de configurar la medición.
ADQ2 "Registro" (Modo 4): - Canales Analógicos de entrada - Máximo 4 - Tipo instrumentación	La placa registrará en alguna de las memorias disponibles el estado de los canales analógicos y digitales elegidos al momento de configurar la medición. En el instante en que se lo requiera, vía el canal de comunicación elegido, se podrán descargar los datos de la medición registrados y realizar el procesamiento correspondiente.
AUI (Modo 5): - Canales Analógicos de entrada - Máximo 8 - Canales Analógicos de salida - Máximo 2 - Canales Digitales de entrada - Máximo 8 - Canales Digitales de salida a relé - Máximo 4 - Canales Digitales de salida Open Drain - Máximo 4 - Salidas PWM - Máximo 2 - Comunicación RS232 y RS485	La placa deberá ser capaz de medir sobre todos los canales de entrada especificados en la configuración, y de acuerdo a la programación, actuar sobre los canales de salida correspondientes. Esto implica la existencia de un lazo de control, ya sea remoto (la toma de decisión está en un centro de automatización); o un lazo local, en donde la misma placa toma las decisiones correspondientes. NOTA: El presente proyecto no abarca la implementación de un lazo de control local, pero tiene todo lo necesario para implementar un lazo de control remoto.
MDT (Modo 6): - Entre 2 entrada - Sobre una misma entrada	La placa deberá ser capaz de medir tiempos entre eventos. Los mismos se manifiestan a través de un cambio de estado en una misma entrada digital, o entre dos entradas digitales distintas. El resultado se informará a través del canal de comunicación que corresponda.

El detalle de cómo fue estructurado y codificado el firmware se encuentra disponible en la página del proyecto: https://github.com/SADyCUNGSIDEI/Firmware

Si bien algunas de las bibliotecas disponibles para uso en el entorno de programación Arduino podrían no estar lo suficientemente probadas, planteando dudas relativas a la fiabilidad y/o estabilidad del firmware, cabe destacar que como nuestro firmware es abierto, cualquier interesado puede reescribirlo con las bibliotecas que considere adecuadas. Es decir, si la estabilidad o fiabilidad no es suficiente, se puede reescribir la biblioteca que está generando el problema o, en su defecto, todo el firmware.

d) Software

Para proveer a los usuarios de una primera[2] interfaz de comunicación con el sistema de adquisición y control, se desarrolló un software utilizando lenguaje Python 2.7 [11][12]. La selección de este lenguaje se justifica principalmente por: (1) ser de código abierto, (2) cuenta con soporte de una comunidad activa de usuarios y programadores, (3) está muy documentado, (4) los programas se ejecutan en múltiples plataformas, prácticamente, sin modificaciones en el código fuente, (5) existía el *know-how* en el equipo de trabajo, (6) soporta múltiples paradigmas de programación, (7) permite desarrollar aplicaciones complejas, y (8) dispone de numerosas bibliotecas de código abierto para aplicaciones específicas como gráficos 2D y 3D, comunicaciones, interfaces gráficas de usuario, cálculo científico y desarrollo web.

Las bibliotecas gráficas utilizadas son: PyQt [14] para el diseño de ventanas y PyQtGraph [14] para el plotteo de los datos en gráficos en dos ejes cartesianos.

La diagramación de este software se presenta en tres capas:

– la capa de presentación, en donde la vista es creada en archivos .xml de QtDesigner [15] y controlada mediante Python (que hace uso de los archivos .xml de la vista);
– la capa de lógica, en donde parte de la lógica de la placa es representada, así como su estado; y
– la capa de acceso a datos, en donde se guarda información en el disco duro y se realiza la comunicación con el puerto serie de la placa.

El orden de las capas es: vista – lógica – acceso a datos. Cada capa solo hace uso de la capa inmediatamente inferior, es decir, la capa de vista solo ve a la capa lógica y esta última ve solo a la de acceso a datos.

[2] Dado que el sistema se diseñó considerando el uso de hardware y de software libre, la intención de proveer de una primera interfaz está lejos de ser una limitante o de considerar, de esta forma, cerrado este aspecto. Esta interfaz es el primer elemento de intercambio, el desarrollo posterior de una HMI o de una PDA resultan ejemplos de posibles interfaces a desarrollar en el futuro.

En la fig. 5 se muestra una pantalla como ejemplo de una de las visualizaciones ya generadas, representando una variable aleatoria simulada por el mismo software.

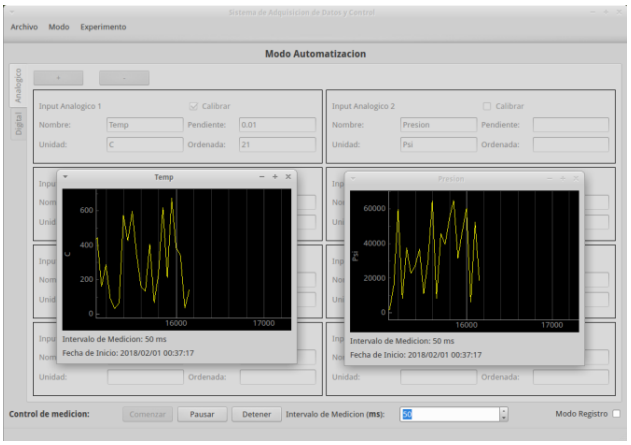


Fig. 5. Captura de pantalla de la interfaz gráfica del software

III. PRUEBAS PRELIMINARES

Ya se ha mencionado anteriormente la dificultad transitada respecto de la disponibilidad de los componentes para el montaje de la placa prototipo. Por esta razón, se tomó la decisión de realizar los primeros ensayos sobre placas de prueba y, de esta forma, analizar aspectos fundamentales, tales como: el comportamiento de los *drivers* de los dispositivos, la velocidad de conversión del ADC, la comunicación por USB y RS232 y la medición de señales sin la etapa de conformación y/o amplificación.

Si bien se tenía absoluta conciencia de que las mediciones de este tipo no demuestran cómo se va a comportar el equipamiento definitivo, pueden servir para ajustar el funcionamiento individual de componentes como los ya mencionados.

Hasta este momento, ya se ha probado todo el set de comandos, se logró establecer una comunicación satisfactoria entre una PC, en dónde funcionaba el software, y el firmware del equipo por USB y RS232; probándose inclusive la modalidad de transmisión continua de datos. En cuanto a la comunicación por Wifi, solo se probaron comandos básicos, ya que la influencia del limitado ancho de banda, no ha posibilitado realizar mediciones de transmisión continua. También se realizaron pruebas de transferencia de datos vía RS485 sin protocolo ModBus, ya que solo se quería probar hasta la capa de conectividad pero no entrar todavía en el uso de protocolos que complejizaban estas primeras pruebas.

Para las pruebas de muestreo de señales analógicas se colocó un generador de señal Rigol DG1022 y un Osciloscopio Tektronix TDS2001C a la entrada, de forma tal de disponer de toda la información de la señal inyectada a la placa de prueba (Figs. 6 y Fig. 7). Por otro lado, se le solicitó al software de la PC que mostrara en tiempo real la señal detectada en el canal correspondiente, recabando dichos datos a través de una comunicación USB.



Fig. 6. Ensayo con placa de prueba



Fig. 7. Instrumental de medición del ensayo

Los resultados fueron satisfactorios para las señales sinusoidal y cuadrada, en frecuencias hasta 100Hz (Fig. 8), donde se pudo verificar el correcto funcionamiento de todos los componentes involucrados en la prueba. Es importante destacar que las curvas obtenidas estaban dentro de los resultados esperados, pero no se procedió a realizar una medición válida del error total del sistema dado que no se dispone de la placa definitiva, por lo que una evaluación de este tipo no aportaría datos relevantes en esta instancia.

Cuando el mismo ensayo se llevó a cabo a frecuencias más elevada (>1KHz), comenzaron a manifestarse dos problemáticas: (1) el software tuvo problemas de estabilidad, colapsando las colas asignadas a la recepción de datos y graficación; (2) en el firmware se detectó una incompatibilidad entre el modo de manejo del ADC y la atención de los eventos seriales.



Fig. 8. Imagen de salida del sistema durante el ensayo, a 100Hz

Luego de un análisis detallado de la problemática del firmware surgida en estos primeros ensayos, se llegó a la conclusión que había que reestructurar la tarea de atención del ADC para poder bajar los tiempos de muestreo por debajo de 1ms. La consecuencia de este análisis llevó a la reescritura del driver del ADC y la eliminación del uso del *Scheduler* (biblioteca de Arduino) [16], con lo cual se superó el escollo de los 100Hz.

IV. DESARROLLO DE RECURSOS HUMANOS

El desarrollo de la placa prototipo que se detalló previamente, supuso la formación específica de dos estudiantes universitarios.

Inicialmente se unió el estudiante de la Carrera de la Licenciatura en Sistemas, Leandro Funes, como adscripto al proyecto; quién trabajó principalmente en el desarrollo integral del Software del sistema. Esta dedicación posibilitó el trabajo conjunto no sólo con el estudiante Funes, sino también con toda el área de Sistemas, ya que debimos definir criterios, tanto para el armado de un software adecuado a los requerimientos definidos, como así también, la realización de una tarea que implique un desarrollo formativo incremental para el estudiante. Este trabajo le brindó a Funes la posibilidad de escribir un software en un lenguaje de programación distinto a los ya estudiados en su carrera.

También se incorporó, como participante del proyecto, el estudiante de la Tecnicatura Superior en Automatización y Control, Gonzalo Ribera, quien contribuyó en el desarrollo de la modularización del firmware. Esto le permitió tomar contacto directo con microcontroladores de 32 bits, conocer su arquitectura y la realización de bibliotecas para los respectivos *drivers.*

Finalmente, se incorporó como adscripto del proyecto, Agustín Alexander, estudiante de la Licenciatura en Sistemas, quién realizará actividades vinculadas con los usos posteriores que ya se prevén para la placa desarrollada. Inicialmente, trabajará en la asistencia del uso de la placa para la automatización y el control automático del movimiento de una parábola para mantener el sol en el foco de la misma, el cual accionará un motor Stirling para la producción de energía eléctrica en pequeña escala.

Específicamente una de las placas prototipo se utilizará en las prácticas de la materia Desarrollo Avanzado con Microcontroladores, de la Tecnicatura Superior en Automatización y Control.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En principio, se han alcanzado ciertos hitos que indican que la investigación se encuentra en el camino correcto, ya que:

- se han diseñado todos los módulos de hardware, firmware y software del sistema;
- se dispone de las placas (PCB) en condiciones de ser montados los componentes;
- se probaron el 70% de los módulos en los ensayos con placas de prueba acondicionadas a tal efecto.
- los primeros resultados de las pruebas fueron satisfactorios;
- se corrigieron errores de firmware que serán clave para la correcta medición de las señales analógicas.

Por otro lado, el trabajo que queda por realizar en lo inmediato tiene distintas aristas, de las cuales las más destacadas son:

- realizar el montaje final de componentes en las placas previstas (dado que se ha vuelto a retrasar la entrega de los componentes, se estima que las placas estén finalizadas para los primeros días del mes junio de 2018);
- verificar el correcto funcionamiento del conjunto, tanto en sus aspectos de medición, como en los de comunicación;
- caracterizar el error de medición en cada uno de los modos de funcionamiento, contrastando los resultados con los entregados por un instrumento patrón;
- documentar exhaustivamente la arquitectura y el uso del sistema facilitando a los usuarios su participación en el proyecto y el uso de este sistema.

Finalmente, una vez avanzado en estos últimos ítems y, con la consecuente publicación en la página web de todo la información y los resultados de las pruebas, se torna importante la adhesión que tenga de la comunidad universitaria y de investigación para enriquecer un sistema que está pensado para ser mejorado, ampliado y enriquecido con nuevos componentes, tanto de hardware como de software.

De acuerdo a los valores manejados hasta el momento por la fabricación de la placa y componentes, se verifica que los costos están dentro de los valores estimados; de esta forma, se puede extrapolar que la versión final del sistema tendrá un costo menor a un “enlatado” del mercado, con prestaciones equivalentes [17][18][19].

VI. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos muy especialmente, por la dedicación y el compromiso mostrado por los dos estudiantes que trabajaron como adscriptos en el proyecto de investigación: Leandro Funes, estudiante de la Licenciatura en Sistemas y Gonzalo Ribera, estudiante de la Tecnicatura en Automatización y Control.

En el marco de las pruebas de laboratorio, queremos expresar nuestro especial agradecimiento al personal del Laboratorio de Ingeniería del Instituto de Industria de la Universidad Nacional de General Sarmiento por la asistencia técnica, la provisión de instrumentos y la paciencia.

VII. REFERENCIAS

[1] https://www.researchgate.net/publication/305305142_Data_acquisition_system_for_didactic_laboratories_based_on_open-source_hardware_and_free_software

[2] A. Gibb, *Building Open Source Hardware: DIY Manufacturing for Hackers and Makers*, Addison-Wesley Professional, 2015

[3] J. M. Pearce, *Building Research Equipment with Free, Open-Source Hardware*, Science, 337, 1303 – 1304, 2012.

[4] https://store.arduino.cc/usa/arduino-due

[5] http://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATsam3x8e

[6] https://github.com/SADyCUNGSIDEI/

[7] Circuitos impresos: http://www.mayerpcb.com/

[8] Componentes electrónicos: http://www.farnell.com/

[9] Montaje y ensamble de placas electrónicas: http://www.assisi.com.ar/

[10] Placa de prueba: https://www.mikroe.com/uni-ds

[11] http://python.org

[12] J.M. Hughes, *Real World Instrumentation with Python*, Sebastopol: O' Reilly, 2010.

[13] http://goo.gl/jFU0Bv

[14] http://www.pyqtgraph.org/

[15] http://doc.qt.io/archives/qt-4.8/designer-manual.html

[16] https://www.arduino.cc/en/Reference/Scheduler

[17] J. M. Pearce, *Open-Source Lab: How to Build Your Own Hardware and Reduce Research Costs*, Oxford: Elsevier, 2014.

[18] M. Gopalakrishnan y M. Gühr, *A low-cost mirror mount control system for optics setups*, American Journal of Physics, 83, 186, 2015.

[19] K. Zachariadou et al., *A low-cost computer controlled Arduino based educational laboratory system for teaching the fundamentals ofphotovoltaic cells*, European Journal of Physics, 33, 1599, 2012.

Plataforma robótica para aprendizaje activo multidisciplinar

Álvaro Rodríguez del Nozal
Departamento de ingeniería
Universidad Loyola Andalucía
Sevilla, Spain
arodriguez@uloyola.es

Fabio Gómez-Estern
Departamento de ingeniería
Universidad Loyola Andalucía
Sevilla, Spain
fgestern@uloyola.es

Daniel Gutierrez
Departamento de ingeniería
Universidad Loyola Andalucía
Sevilla, Spain
dgutierrez@uloyola.es

***Abstract*—Las profesiones relacionadas con la Automática requieren conocimientos y competencias muy diversas, entre las que se incluyen materias tecnológicas, como la informática, robótica, sensores, aparamenta industrial, etc., y aspectos más abstractos, como modelado matemático, algoritmos de optimización o aprendizaje automático. En este trabajo se emplea un robot industrial, un dispositivo empotrado IoT con cámara web, y un servidor ejecutando algoritmos MATLAB para el desarrollo de prácticas de laboratorio destinadas a desarrollar competencias múltiples, en las materias mencionadas.**

***Index Terms*—Industria 4.0, Internet of Things, Educación en Automática, Robótica, Visión por computador, impresión aditiva.**

I. Introducción

La formación en el área de Automática es compleja y diversa. Por una parte, requiere un conocimiento especializado de distintas tecnologías: robots, sensores, actuadores, informática industrial, etc. Por otra parte, requiere una preparación abstracta (matemáticas, modelado, análisis de sistemas) y algorítmica (programación, optimización, aprendizaje automático). En un plan de estudios de grado, los estudiantes asisten a sesiones prácticas de laboratorio de cada una de estas materias específicas, pero en el nivel de máster este enfoque no es suficiente, al requerir habilidades de resolución de problemas más realistas, de naturaleza multidisciplinar. En la práctica, un ingeniero debe ser integrador de equipos, conceptos y procedimientos provenientes de distintas áreas. En este trabajo se presenta un equipo de prácticas de desarrollo propio y un conjunto de actividades con el fin de diseñar experiencias prácticas complejas en las que se desarrollen competencias de todas las materias mencionadas, de una forma integrada. La plataforma se ha desarrollado empleando elementos existentes en un típico laboratorio de ingeniería, con mínima inversión adicional. El resultado es un almacén automático robotizado en el que se programan las trayectorias del manipulador tanto a bajo nivel (lenguaje propio del robot) como en un entorno de desarrollo de algoritmos de métodos cuantitativos.

En la literatura podemos encontrar multitud de plataformas docentes de robots que van desde la construcción de pequeños robots seguidores de lineas hasta el estudio de microcontroladores que componen a éstos [1]- [4]. En primer lugar consideramos la programación de robots. Esta es una competencia típica a desarrollar en un segundo o tercer curso de un grado de la rama industrial, como el de ingeniería electromecánica o ingeniería de las tecnologías industriales. Existen multiples entornos en los que desarrollar estas capacidades, pero siempre es preferible que se trate de un sistema de programación offline, con capacidad de simulación y otras funcionalidades que proporcionen feedback al alumno: simulación 3D, interacción con piezas y elementos en el espacio de trabajo, interacción con otros robots, etc. Uno de los entornos más satisfactorios en este sentido es el RobotStudio de ABB [5], generalmente facilitado en condiciones especiales para los centros formativos. Este es el entorno que emplearemos, para programar robots manipuladores concretamente con el lenguaje RAPID.

Otra habilidad tecnológica que es preciso desarrollar en los futuros ingenieros y que es parte fundamental del paradigma de la Industria 4.0 es la programación de aplicaciones distribuidas mediante dispositivos IoT como Raspbery Pi [6] y Arduino [7]. La idea de trabajar con estos dispositivos va más allá del concepto de dominio de la programación y los microcontroladores propios de las titulaciones TIC. El movimiento Industria 4.0 está relacionado con el movimiento maker, y la posibilidad de desarrollar soluciones ad hoc [8] en el seno de cualquier sistema de producción sin necesidad de incurrir en altos costes ni de recurrir a intermediarios. Y una de ls plataformas en las que esto es posible, con una curva de aprendizaje rápida es el entorno Raspberry Pi con el lenguaje de programación Phyton [9].

Una gran oportunidad para el desarrollo de aplicaciones con capacidad de reaccionar en entornos industriales sin gran coste de instalación es la visión por computador. Hasta hace pocos años, esta tecnología ha sido del interés de una comunidad minoritaria muy especializada, existiendo una creencia general de que es preciso gozar de grandes conocimientos para poder explotarla en situaciones reales. Sin embargo, en la parte final de este trabajo se pondrá en evidencia que esto no es así. Con el mismo lenguaje de programación Phyton y empleando la plataforma Raspberry Pi, los alumnos desarrollarán un algoritmo de visión a través

de la cámara incorporada para determinar la información que el sistema necesita para actuar sobre su entorno. Más concretamente, se tratará de determinar a partir de una imagen capturada el estado completo del almacén automático. Mediante algoritmos tan sencillos como la identificación de los colores predominantes en una zona concreta, y mediante la adecuada transformación de coordenadas del sistema de referencia plano de la imagen al tridimensional del almacén, podremos identificar automáticamente qué tipo de pieza hay ubicada en cada posible hueco del almacén, evitando tener que cargar en memoria de programa esta información al inicio de la operación. Las bibliotecas emoleadas para el análisis de imagen son OpenCV.

Un sistema capaz de reaccionar y resolver problemas de producción en tiempo real debe estar dotado de una capacidad de inteligencia computacional efectiva. Por ejemplo, para toma de decisiones complejas como es la determinación de la trayectoria más corta del robot a la hora de vaciar el almacén, es necesario trabajar con matrices y con algoritmos de optimización. En nuestro caso, y por el valor didáctico al conectar con las competencias adquiridas en otras materias del grado de ingeniería, emplearemos MATLAB.En este entorno, será necesario desarrollar un algoritmo de toma de decisiones para el vaciado secuencial del almacén, de manera que se invierta el mínimo tiempo posible. Esto implica el uso de funciones de optimización entera parea el cálculo dela ruta mínima.

Finalmente, los componentes descritos deben operar con un conjunto de piezas construidas mediante impresión 3D por los estudiantes, y deben coordinarse mediante rutinas de comunicaciones basadas en sockets TCP/IP. La plataforma de aprendizaje consiste, por tanto, en un sistema de control y decisión distribuido con tres aplicaciones ejecutándose de manera coordinada: Robot IRB120 y su sistema operativo Robotware, Raspberry Pi y MATLAB.

II. Objetivos

El objetivo de este artículo es introducir una plataforma de desarrollo para prácticas multidisciplinares empleando un robot de ABB modelo IRB120, Raspberry Pi y MATLAB. En dicha plataforma desarrollaremos múltiples competencias profesionales. En concreto, las competencias a desarrollar son las siguientes:

- Programación de robots.
- Prototipado y fabricación aditiva.
- Introducción a algoritmos e inteligencia artificial.
- Programación en MATLAB.
- Automatización industrial.

Dichas competencias se desarrollan mediante un conjunto de actividades, algunas de las cuales tienen carácter competitivo.

El principal propósito es construir un almacén automático a pequeña escala. Por ejemplo, es habitual encontrar este tipo de sistemas en la industria farmacéutica y biotecnología. La plataforma construida se empleará en las asignaturas de Informática, Mecatrónica, Automatización y Robótica Industrial y Automatización de Sistemas de Producción para desarrollar diferentes aptitudes de los alumnos. Los medios empleados para el desarrollo de la actividad son lo siguientes:

- Impresora 3D de bajo coste con filamento ABS.
- Robot industrial ABB modelo IRB120 y su controlador correspondiente.
- Entorno de programación y simulación RobotStudio v6.01 o superior.
- MatLab R2017b (aunque bastaría con casi cualquier otra versión).
- Estantería de miniaturas.

Es importante resaltar el bajo coste de todos los recursos empleados a excepción del brazo robótico con el cual ya se contaba de partida.

III. Desarrollo de la plataforma

El prototipo de almacén automático a desarrollar se trata de una estantería de miniaturas con varias baldas. El robot, gracias a una garra diseñada y acoplada en su extremo, accederá a una serie de discos y los situará en las diferentes posiciones accesibles en cada balda. Es importante resaltar la posibilidad de apilar varios discos en una misma posición de la estantería. Tanto los discos como la garra han sido diseñados mediante fabricación aditiva. Un esquema de la estructura del prototipo puede verse en la Figura 3. En las siguiente secciones se detallan uno a uno los componentes constituyentes del almacén automático.

A. Estantería

Para la estructura del almacén se ha optado por adquirir una estantería de miniaturas de metacrilato de poco coste. Las estantería cuenta con cuatro baldas. Hemos decidido dividir cada balda en cuatro posiciones de tal manera que existen 16 posiciones posibles para situar los diferentes discos a almacenar en la estantería. Además, el diseño de los discos permite su apilación uno sobre otro. Hemos decidido fijar 4 como el número máximo de discos apilados en una posición de la estantería. Tenga en cuenta que todas estas posiciones pueden variar según la estantería utilizada y la alcanzabilidad del brazo robótico. Una foto de la estantería puede observarse en la Figura 1.

B. Herramienta

Con el fin de acoplar diferentes manipuladores al extremo del brazo robótico se ha diseñado mediante fabricación aditiva un cabezal adaptable (Figura 2). Este cabezal permite acoplar de forma robusta la garra diseñada gracias a un sistema de muelles que impiden el movimiento de la herramienta una vez introducida. Para poder facilitar el sistema lo máximo posible, se ha optado por diseñar una herramienta con forma de transpaleta de tal modo que pueda tomar los discos a través de hendiduras en la parte inferior de éstos y elevarlos como si de un pallet se tratara. Como se puede observar en la figura,

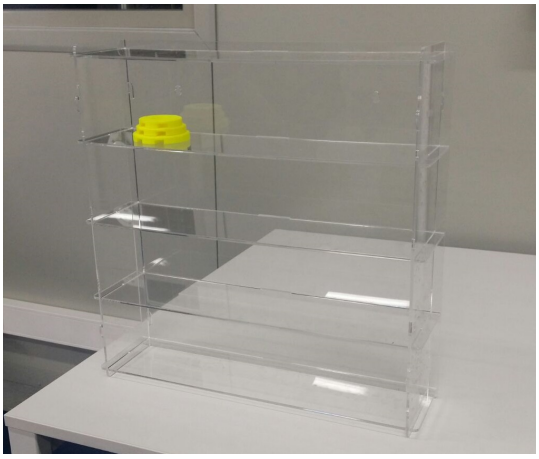


Fig. 1. Estantería utilizada para el montaje de almacén automático.

los brazos de la transpaleta se han orientado 45^o respecto a la normal de la base, que coincide a su vez con el extremo del brazo articulado. Así el acceso por parte del robot se facilita pudiendo cubrir un amplio rango de funcionamiento.

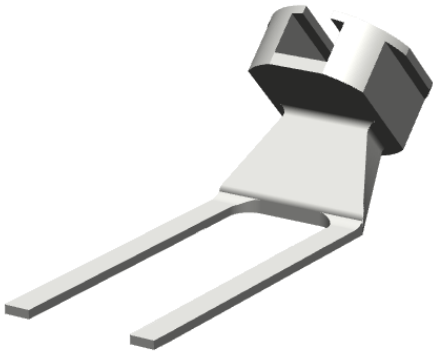


Fig. 2. Herramienta diseñada para el desarrollo de la práctica.

C. Discos

Con el fin de generar una plataforma versátil y escalable, se ha decidido optar por discos para su almacenamiento. Los discos ofrecen la posibilidad de apilarlos uno encima de otro permitiéndonos tener un sistema de almacenamiento con multitud de posibilidades. Con el fin de distinguir unos discos de otros, se ha optado por diseñarlos con diferentes colores. Todos los discos han sido diseñados mediante un programa CAD y han sido imprimidos mediante fabricación aditiva con filamento de diferentes colores. Además, para facilitar el apilamiento inicial de los discos por parte del usuario, se han introducido unas hendiduras en la parte inferior de los discos y unos salientes en la parte superior de los mismos de tal manera que una vez apilados encajan perfectamente uno encima del otro. En la Figura 3 se puede ver un conjunto en el entrono Robotstudio de todos los componentes que constituyen el sistema.

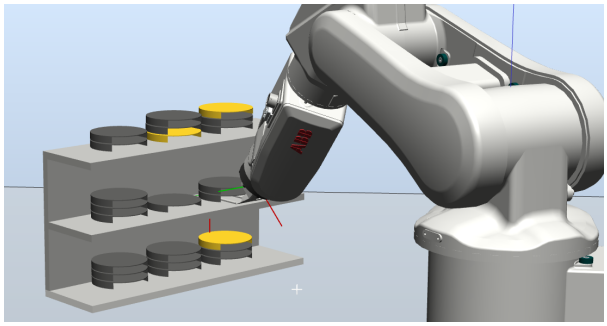


Fig. 3. Almacén automático en entrono de desarrollo y simulación RobotStudio.

IV. Entorno de programación

Uno de los conocimientos principales que el alumno debe adquirir durante la realización de la práctica es la familiarización con el entorno de programación y visualización RobotStudio desarrollado por la empresa multinacional de electricidad y robótica ABB; así como el lenguaje de programación específico de robots RAPID. Además, dada la amplia experiencia de los alumnos de la Universidad en el lenguaje de programación MatLab, se propone comunicar el simulador de RobotStudio con MatLab para poder generar programas y explotar las características conjuntas de ambos softwares.

A. RobotStudio

RobotStudio es un software de simulación y programación fuera de línea diseñado por ABB. Con este software podemos crear, programar y simular células y estaciones de robots industriales ABB. Es un simulador comercial potente que nos permite crear multitud de estaciones, importar geometrías 3D, programar y simular tanto la cinemática como la dinámica de las estaciones (gracias a su módulo de simulación física).

Los pasos generales para llevar a cabo la programación del robot son:

- Insertar el robot en el espacio de trabajo y definir su correspondiente sistema de control.
- Definir las posiciones del robot o targets. Dichas posiciones vienen definidas por la posición del extremo del robot en el espacio cartesiano tridimensional así como la orientación de la misma y la configuración del robot para alcanzarla.
- Definición de trayectorias entre las diferentes posiciones. En esta definición se pueden configurar varios parámetros según la naturaleza del movimiento que se quiere llevar a cabo.
- Generación del programa RAPID a partir de las simulaciones de trayectorias llevadas a cabo.
- Familiarización con las instrucciones generadas.
- Simulación y depuración.
- Carga en el robot real y ejecución manual.

En la Figura 4 se puede observar un ejemplo de programa y su correspondiente código RAPID.

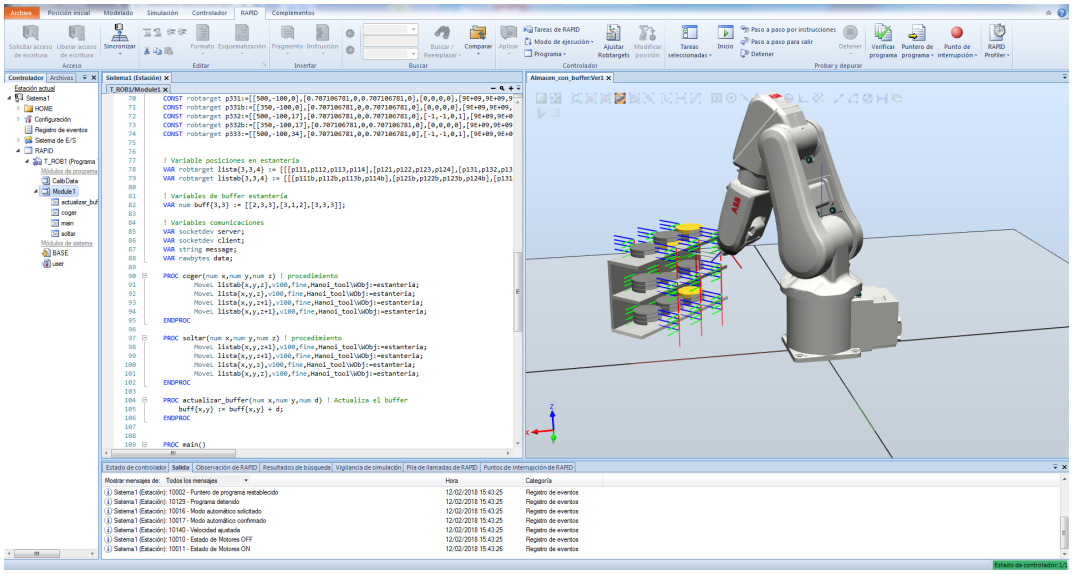


Fig. 4. Entorno de programación y simulación RobotStudio. A la izquierda se puede observar el código RAPID generado mientras que a la derecha el entrono de simulación con geometrías importadas.

B. MatLab

Dado que los alumnos de la Universidad tienen amplios conocimientos del lenguaje de programación MatLab, se decide introducir una interfaz de comunicación entre dicho programa y RobotStudio. De esta manera, se pueden generar problemas prácticos que no precisan que el alumno tenga unos profundos conocimientos de programación en RAPID ni del entorno RobotStudio según la asignatura en la que desee emplearse.

MatLab nos permite generar e implementar algoritmos de control que, gracias a la comunicación con el robot, defina los movimientos que debe llevar a cabo para un correcta gestión del almacén automático.

C. Raspberry Pi

Raspberry Pi es una computadora de bajo coste desarrollada en Reino Unido por la Fundación Raspberry Pi. El objetivo principal de la plataforma es estimular la enseñanza de ciencias de la computación en los centros de enseñanza. Nuestra plataforma contará con una Rapberry Pi conectada a una cámara de tal manera que podrá tomar imágenes de las diferentes posiciones en las que se sitúan los discos identificando de tal forma si existe un disco en esa posición y en caso afirmativo el color del mismo. Para ello nos apoyaremos en la biblioteca OpenCV. OpenCV es una biblioteca libre de visión artifical originalmente desarrollada por Intel. La computadora tomará imágenes del almacén y transferirá dicha información a MATLAB, que será el software encargado de procesarla y enviar las órdenes de movimiento al robot. La comunicación entre ambos dispositivos se realizará a través de TCP/IP.

V. Torres de Hanoi

Con el fin de realizar una sesión introductoria a todos los conceptos detallados en las secciones previas, se plantea el problema de las torres de Hanoi. El objetivo de esta práctica es familiarizarse con el robot articulado ABB IRB 120 con el cual se cuenta en el laboratorio de la Universidad Loyola Andalucía. Para ello, se proponen una serie de ejercicios a realizar mediante el software RobotStudio y su posterior implementación en el robot real. La práctica esta diseñada para realizarse en grupos de tres personas en dos horas y es necesario entregar el código RAPID generado por RobotStudio al finalizar la misma. Al tratarse de una práctica introductoria de familiarización con el entrono de desarrollo su evaluación se basará únicamente en la asistencia.

El trabajo a realizar consiste en el desarrollo de un programa para el robot apoyándose en el software RobotStudio que permita hacer movimientos de varios discos en una base resolviendo el problema de las torres de Hanoi. Para ello haremos uso de los discos y la herramienta definida en la Sección III.

Las torres de Hanoi es un rompecabezas matemático introducido en 1883 por el matemático francés Édouard Lucas. Consiste en un número de discos perforados de radio creciente que se apilan insertándose en uno de los tres postes fijados a un tablero. El objetivo es trasladar las torres desde un poste extremo al poste contrario teniendo en cuenta que no es posible apilar un disco de mayor radio sobre uno de menor. Es un juego de fácil comprensión y muy utilizado en la introducción a la teoría de algoritmos.

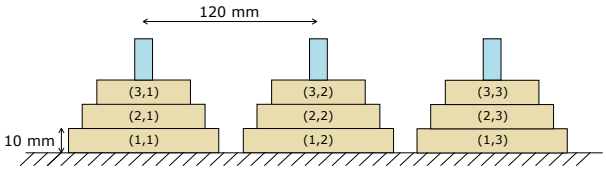


Fig. 5. Esquema aportado junto al guión de la práctica. Las coordenadas de la posición $(1, 1)$ son también proporcionadas.

El alumno contará con la posición inferior de uno de los postes y, a partir de él, debe ser capaz de obtener el resto de posiciones mediante desplazamientos relativos (observe la Figura 5). De igual forma el alumno debe ser capaz de:

- Insertar la herramienta de trabajo en el entorno de RobotStudio y acoplarla al extremo del robot.
- Definir las posiciones para que el robot pueda realizar, a partir de ellas, los movimientos necesarios para resolver el juego.
- Definir la trayectoria y asegurarse de introducir unas configuraciones correctas del brazo robótico.
- Simular el movimiento apoyándose en el simulador de fenómenos físicos que se dispone en RobotStudio a partir de la versión 6.01.
- Generar el código en lenguaje robot (RAPID) e implementarlo en el robot real.

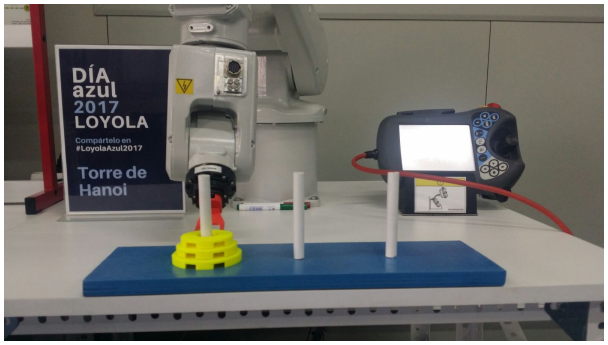


Fig. 6. Montaje de las torres de Hanoi.

Como se puede observar, esta práctica permite al alumno introducirse al entorno de programación de RobotStudio, así como implementar un algoritmo para la resolución de un rompecabezas matemático como es las torres de Hanoi. Ya que se trata de una sesión introductoria, se decide realizar el juego utilizando únicamente tres discos aunque se considera como trabajo adicional el desarrollo de un algoritmo genérico para la resolución del problema para un número indeterminado de discos.

VI. Almacén automático

Una vez introducido el entorno de desarrollo RobotStudio y que el alumno se haya familiarizado con el robot, en esta práctica se plantea el siguiente problema de optimización:

Problema: Desplazar un número determinado de discos de unas posiciones a otras en el mínimo tiempo posible. Tenga en cuenta que al estar los discos apilados uno sobre otro es posible querer mover un disco cuyo movimiento no puede realizarse hasta apartar los discos que descansan sobre él.

Esta práctica se introduce con un alto factor competitivo ya que cada grupo de alumnos debe desarrollar un algoritmo que permita resolver el problema en un tiempo inferior al del resto de grupos. La práctica se divide en varias etapas:

1) El alumno deberá medir los tiempos que el robot utiliza para moverse de una posición a otra e incluirlos como datos en la resolución de su problema.
2) El alumno deberá generar una función en MatLab que a partir de el número inicial de discos en cada posición de la estantería, las posiciones de los discos de partida y las posición de destino de los mismos, devuelva los movimientos que debe realizar el robot. Para el desarrollo de esta función se propone un algoritmo iterativo que, a partir de una solución factible, vaya mejorando hasta alcanzar una solución cercana o igual a la óptima. Tenga en cuenta que esta función es versátil y debe adaptarse a cualquier parámetro de entrada.
3) Finalmente, se facilita al alumno un programa en Robot Studio y una función en MatLab que permite la sincronización entre ambos elementos de software. Inicialmente la estrategia será probada en el entorno de simulación de RobotStudio y durante una última clase de esta práctica cada grupo de alumnos presentará su algoritmo de optimización teniendo lugar las pruebas finales y elección del mejor grupo.

Ahondemos algo más en la segunda etapa de la práctica concerniente al desarrollo del algoritmo óptimo. Para ello, introducimos las siguientes variables: Sea $n_{i,j}$ el número de discos en cada posición de la estantería dada por la fila $i \leq i_{max}$ y la columna $j \leq j_{max}$ donde $i_{max} \times j_{max}$ son las dimensiones de la estantería que en nuestro caso se limita a 4×4. Sea N el número máximo de discos que se pueden apilar en cada uno de los estantes. El tiempo que tarda el robot de transportar un elemento desde una posición de la estantería a otra viene dado por la siguiente expresión:

$$t = t_c + t_d + t_m d,$$

dónde t_c y t_d son el tiempo de carga y descarga de un disco por el robot, respectivamente; t_m es el tiempo que tarda el robot en desplazar una pieza un metro y d es la distancia entre los estantes. Con todo esto se pueden plantear distintas estrategias para la resolución del problema planteado:

- Una de las soluciones más evidentes es la de plantear por separado cada movimiento de piezas. Es decir, el movimiento de cada disco de una posición de origen a una posición de destino independientemente. Entonces, para cada movimiento, será necesario primero ver si la posición de destino del disco está en las condiciones adecuadas, es decir, si existe el número necesario de

discos apilados bajo su posición y no existen discos apilados en la posición o encima de ella. El siguiente paso sería retirar todos los discos que estén encima de la pieza de origen para poder tomarla. Una vez cogida la pieza, faltaría el último movimiento para situarla en la posición de destino. El movimiento de todas las piezas hasta llegar al último movimiento pueden realizarse de muchas maneras siendo la más inmediata buscar una posición libre diferente de la de origen y destino y depositar ahí el disco.

- La estrategia anterior podría mejorarse si los movimientos intermedios se realizan con un criterio de minimizar el tiempo en el que el robot se encuentra en movimiento, es decir, intentando depositar los discos en posiciones cercanas a la posición de dónde se retiran.
- Del mismo modo si los movimientos de los discos intermedios se considera como un problema único y no plantearlo cada vez que se retira uno, el tiempo total de movimiento puede disminuir aún más.
- Otra posibilidad es considerar más de un movimiento de discos dado por los argumentos de la función al mismo tiempo. Así, cuando realicemos un movimiento, los discos que no se utilicen no ocuparán posiciones que dificulten los posteriores movimientos.

La función a desarrollar por los alumnos tendrá la siguiente forma:

$$[mov] = algorithm(n_{i,j}, t_c, t_d, t_m, Origen, Destino),$$

dónde $Origen$ y $Destino$ son matrices de tres columnas donde se almacena la celda de la estantería a la que acceder (valor en eje x y en eje y) y altura del disco dentro del apilamiento en una misma posición. Tendrán tantas filas como movimientos se deseen realizar. Por otro lado, mov es una matriz que define los movimientos a realizar por el robot que tiene tantas filas como movimientos haya que realizar y en cuyas columnas se almacena un uno o un cero según sea un movimiento de coger o soltar un disco y la posición de la estantería en la cual hay que realizar la operación. Tenga en cuenta que en este caso no es necesario indicar la posición del disco dentro de la pila ya que el programa solo permite coger un disco de la última posición posible. Un ejemplo de lo expuesto anterior sería:

- $Origen = [1, 1, 2]$,
- $Destino = [1, 3, 1]$,
- Resultado: $mov = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & 1 \end{bmatrix}$.

En este simple ejemplo se especifica que se ha de tomar el disco apilado en el segundo nivel de la primera balda y primera columna de la estantería y depositarlo en el primer nivel de la tercera balda, primera columna de la estantería. Como resultado el programa devuelve dos filas que indican que hay que coger un disco (0) de la posición $(1, 1)$ y soltarlo (1) en la posición $(3, 1)$. El programa de RobotStudio tienen un buffer en el que almacena el número de discos apilados en cada posición de la estantería y gestiona de forma autónoma la altura que debe tener en cuenta el robot para acceder a coger o soltar un disco de la estantería.

Se proporciona al alumno funciones de MatLab que a partir del vector mov traduce las instrucciones a movimientos del robot, comunicándose con RobotStudio y llevando a cabo los movimientos en el entorno simulado.

A. Análisis del código desarrollado

En esta sección se pretende describir el código desarrollado para la aplicación propuesta del almacén automático. Los programas de RobotStudio y MATLAB están estructurados de la siguiente manera:

1) Se definen en RobotStudio las variables *RobotTarget* que nos indicarán las posiciones alcanzables para el robot así como las configuraciones necesarias para alcanzarlas. Almacenamos las posiciones de la estantería en dos matrices de tres dimensiones (posición x, posición y y nivel del disco en la posición (x, y)). También se define el buffer que almacenará el número de discos apilados en cada posición de la estantería.

```
! Variable posiciones en estanteria
  VAR robtarget lista{3,3,4} := ... ;
  VAR robtarget listab{3,3,4} := ... ;

! Variables de buffer estanteria
  VAR num buff{3,3} :=
      [[2,3,3],[3,1,2],[3,3,3]];
```

2) A continuación inicializamos las comunicaciones entre RobotStudio y MATLAB. Para ello es necesario definir la dirección IP del cliente y del servidor. En el siguiente ejemplo se puede observar una configuración para trabajar con el simulador de RobotStudio y MATLAB en el mismo ordenador.

```
! Variables comunicaciones
  VAR socketdev server;
  VAR socketdev client;
  VAR string message;
  VAR rawbytes data;

! Crear comm
  SocketCreate server;
  SocketBind server,"127.0.0.1",55000;
  SocketListen server;
  SocketAccept server,client;
```

en el caso de MATLAB el código es aún más sencillo

```
% Se establece la conexion
  tc=tcpip('127.0.0.1',55000);
  tc.ByteOrder = 'littleEndian';
  fopen(tc);
```

3) Una vez abierta la comunicación entre ambos programas simplemente bastará con definir la longitud de datos a enviar y el contenido. Por ejemplo, para enviar desde MATLAB tres datos enteros utilizaremos la siguiente orden:

```
  fwrite(tc,[1 2 3],'int32')
  fread(tc,2);
```

mientras que desde RobotStudio tomaremos cada una de las componentes del vector especificando en qué variable se almacenará y que tipo de dato se espera. De esta manera almacenamos en las variables x, y y z los valores enteros recibidos. Tenga en cuenta que las variables han sido definidas previamente.

```
! Recibir mensaje del cliente
  SocketReceive client,\RawData:=data;
  UnpackRawBytes data,1,x,\IntX:=DINT;
  UnpackRawBytes data,5,y,\IntX:=DINT;
  UnpackRawBytes data,9,z,\IntX:=DINT;
```

4) Una vez finalizadas las comunicaciones entre ambos programas, será necesario indicarlo utilizando los siguientes comandos. En MATLAB:

```
fclose(tc);
```

mientras que en RobotStudio:

```
SocketClose client;
```

VII. Conclusiones y trabajo futuro

Este artículo ha introducido una plataforma robótica para aprendizaje activo multidisciplinar de bajo coste. Se han definido los diferentes componentes de la plataforma así como dos ejercicios prácticos introducidos en varias asignaturas del grado de ingeniería electromecánica. Las competencias adquiridas durante el desarrollo de la práctica son las siguientes:

- CAD y fabricación aditiva de piezas.
- Lenguaje RAPID.
- Entorno de desarrollo MatLab y RobotStudio.
- Simulación, depuración y ajuste de parámetros.
- Algoritmos de optimización.

Como trabajo futuro se considerará su implementación en el segundo cuatrimestre de un proyecto multidisciplinar en la asignatura de Automatización de Sistemas de Producción. La finalidad de este proyecto será abordar una serie de conceptos que componen a la Industria 4.0. Así mismo, se cuenta con el dispositivo Raspberry Pi y se ha comenzado con el desarrollo del reconocimiento visual de las piezas, sin embargo aún se encuentra en una etapa de desarrollo.

Agradecimientos

Proyecto parcialmente financiado por beca TEC2016-80242-P y DPI2016-75924-C2-2-R de AEI/FEDER.

References

[1] J. Ramón, A. Figueres, A. Oller y J. De la Rosa, Plataforma Docente de robots móviles, cooperantes y autónomos, Addison Wesley, Massachusetts, Proc. TAEE 98, Publicaciones UPM, 1998.

[2] J. Ramón, A. Figueres, A. Oller y J. De la Rosa, Laboratorio docente de robots móviles, cooperantes y autónomos, Addison Wesley, Massachusetts, Actas TAEE 2000, UAB, Septiembre 2000.

[3] G. González de Rivera, S. López-Buedo, I. González, C. Venegas, J. Gaarrido y E. Boemo, Plataforma hardware para la enseñanza de robótica en la titulación de ingeniería informática, E.T.S. Ingeniería Informática, Universidad Autónoma de Madrid, Actas TAEE 2002.

[4] Vera, Francisco Javier and Mendoza, Julio Pastor and Domeque, Esther Samper, "Feel like a Cyborg II": Demonstrative system of robot function, Actas TAEE 2012

[5] RobotStudio reference: http://new.abb.com/products/robotics/es/robotstudio

[6] Raspberry Pi Foundation: https://www.raspberrypi.org/

[7] Arduino: https://www.arduino.cc/

[8] Perkins, Charles E and others, Ad hoc networking, Addison-wesley Reading, 2001.

[9] Python Software Foundation: https://www.python.org/

Stirring Up the Learning to Program Robotic Arms Through the Generation of Student Handwriting

1st Jose J. Quintana
Dept. de Ing. Electronica y Automatica
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Las Palmas de Gran Canaria, Spain
josejuan.quintana@ulpgc.es

2nd Moises Diaz
Universidad del Atlantico Medio
35017, Las Palmas de Gran Canaria, Spain
mdiazc@unidam.es

3rd Miguel A. Ferrer
Instituto para el Desarrollo Tecnologico y la Innovacion en Comunicaciones IDeTIC
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Las Palmas de Gran Canaria, Spain
miguelangel.ferrer@ulpgc.es

***Abstract*—The use of robotics arms provides students several advantages in the teaching and learning process, compared to methods based on simulation programs. Moreover, programming the robotic arm to imitate a human action previously carried out by the students, makes them to have a better personal satisfaction. Following up this idea, a lab session has been designed and tested by the authors. It is composed by the following phases: Students first register their personal handwriting on a digitizing tablet. Next, they develop a program to make that a commercial robot writes such piece of handwriting. Then, the commercial robotic arm produce such piece of handwriting on a digitizing tablet. Finally, a comparison between the original handwriting and the one made by the robot is worked out. To evaluate the success of the proposed lab session, a survey was issued to students who followed the course in robotics last semester with encouraging resuts.**

***Index Terms*—Robotics, coordinate frames, lab session, handwriting.**

I. Introduction

Programming robots is crucial subject in several degrees related to the engineering. This subject is focused on providing the principles and applications of robotic systems to students. As part of the skills during the course, it is assumed that the students should be able to acquire the necessary knowledge to determine both the position and orientation of the robots. According to [1] [2], the motivation in the learning and teaching process is necessary for an agile development of the skills.

In this paper we propose a lab session for programming robotic arms. Our main contribution is twofold:

- The use of a real robotic arm against the use of virtual simulators. This allows the student to transfer the theoretical concepts learned in class to a real work environment.
- To encourage motivation, the ultimate goal of the practice is to solve a problem: the generation of a handwritten text with the student's own letter.

To satisfy both contributions, in the proposed lab session, the student first produce a personal piece of handwriting on a digitizing tablet. Next, they are supposed to program the robot in order to execute such piece of handwriting by using the file generated by the tablet as input. Later, the robot writes the programmed piece of handwriting while it is registered on the same digitizing tablet, which is located in the robotic writing area, as it is shown in Figure 1. Finally, the original handwriting and the one made by the robot are compared giving a measure of similarity.



Fig. 1: Example of the robot writing in a digital tablet

With this lab session, students work on the skills related to the position and orientation of coordinate frames. Also, they will work on programming skills since they have to code the required program by manipulating the robotic arm. Beyond the designing of the robot program, student finally can quantify the quality of their performance through qualitative measure and by a visual inspection of the robot handwriting.

This paper is organized as follows. Section 2 explains the basic tools to define position and orientation, as well as for programming a robotic arm. Section 3 shows the student's handwriting record. Section 4 shows a pilot practice conducted in the laboratory. Finally, the article closes with the discussion and conclusions in Section 5.

II. Programming the robotic arm

In this section, it will be described the methodology to program the ABB IRB 120 commercial robot[1] by using the data acquired by a digitizing tablet.

[1]http://new.abb.com/products/robotics/es/robots-industriales/irb-120

A. Representation of the pose of two coordinate frames

In robotics and other fields of science, the combination of position and orientation is referred to as the pose of an object. To represent the pose of two coordinate frames (CF) the homogeneous transformation matrices are widely used [3], [4].

Figure 2 illustrates the pose of the coordinate frame $\{S_1\}$ related to the coordinate frame $\{S_0\}$.

To know their mathematical relationship, a homogeneous transformation matrix such the one shown is used (1).

$$ {}^{0}T_1 = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{1} $$

The homogeneous transformation matrix ${}^{0}T_1$ relates the coordinate frame $\{S_1\}$ to the coordinate frame $\{S_0\}$. This matrix provides the relative position of CF $\{S_1\}$ with respect to $\{S_0\}$ and also the orientation of each of its axes. The direction of the axis $\mathbf{i}_u$ of the coordinate frame $\{S_1\}$ is given by the direction vector $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$, that of the axis $\mathbf{j}_v$ by the vector $\mathbf{o}$ and that of the axis $\mathbf{k}_w$ by the vector $\mathbf{a}$. These three vectors are unit-module vectors and form an orthonormal matrix. On the other hand, the vector $\mathbf{p}$ indicates the position of the system $\{S_1\}$ with respect to $\{S_0\}$.

Another way to represent the orientation of the coordinate frame $\{S_1\}$ with respect to $\{S_0\}$ is through the quaternions. In a quaternion, the orientation of the system $\{S_1\}$ can be obtained by rotating the coordinate frame $\{S_0\}$ an angle θ over a vector $\mathbf{v}$. This is the preferred method to represent the orientation for several robots manufacturers and for the ABB robots as well. A quaternion has four components related to the vector $\mathbf{v}$ and the angle θ, with the following equation:

$$ Q = rot\,(\mathbf{v}, \theta) = \left(cos\left(\frac{\theta}{2}\right), \mathbf{v} sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right) \tag{2} $$

Students have the necessary tools to convert a quaternion to a homogenous transformation matrix and vice versa.

B. Coordinate frames

It is essential to define the appropriate coordinate frames in order to program the robot to make an action, like the handwriting.

The coordinate frames used in this session are shown in Figure 3. On the one hand, $\{S_T\}$ refers to the coordinate frame of the tablet, all sampling points generated by the digital tablet are referred to this CF. On the other hand, $\{S_R\}$ denotes the CF of the base of the robot, all sampling points that are going to be drawn by the robot have to be referred to it. Finally, the CF of the pen $\{S_p\}$ indicates its pose.

The pose of $\{S_p\}$ with respect to the CF of the tablet $\{S_T\}$ is given by the on-line handwriting. Moreover, the pose of $\{S_p\}$ with respect to $\{S_R\}$ represents the desired pose of the pen with respect to the base of the robot.

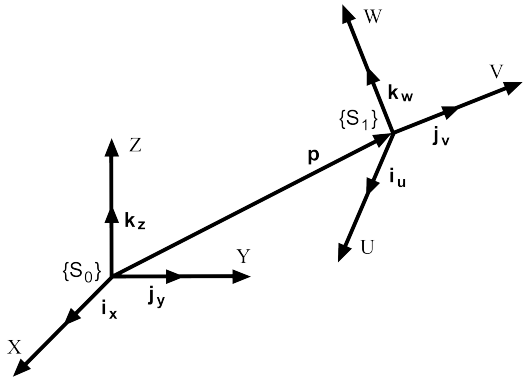


Fig. 2: Coordinate frames $\{S_0\}$ and $\{S_1\}$

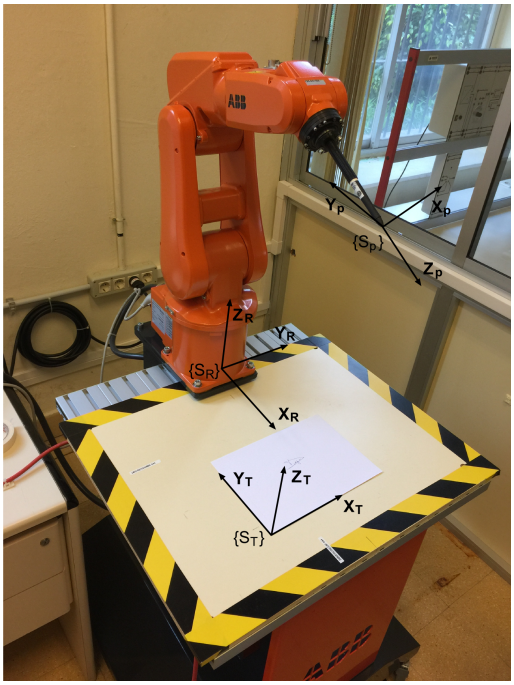


Fig. 3: Coordinate frames assigned to robot, tablet and pen

The homogeneous transformation matrix that relates the CF of the tablet $\{S_T\}$ to the base of the robot $\{S_R\}$ is constant, and it is given by:

$$ {}^{R}T_T = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & p_{Tx} \\ 1 & 0 & 0 & p_{Ty} \\ 0 & 0 & 1 & p_{Tz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3} $$

Where (p_{Tx}, p_{Ty}, p_{Tz}) represent the position of the CF of the tablet $\{S_T\}$ with respect to the CF of the base of the robot $\{S_R\}$.

With the data of the handwriting generated by the tablet and the equations that will be deduced later, the matrix ${}^{T}T_p$ can be calculated for each point. Such matrix relates the pose of each point that was written in the tablet to the CF $\{S_T\}$. This

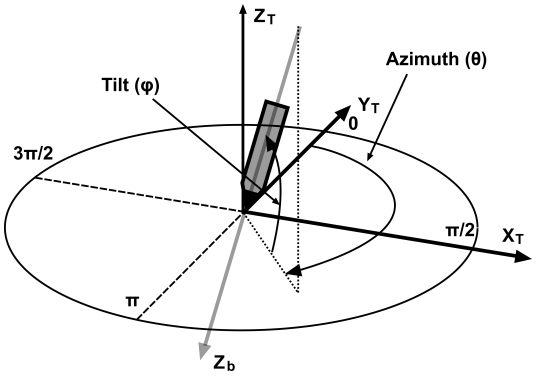


Fig. 4: Orientation of the pen respect to $\{S_T\}$

way, it can be calculated the matrix referred to the base of the robot $\{S_R\}$ for each point using the equation,

$$^{R}T_{p} = {}^{R}T_{T}{}^{T}T_{p} \tag{4}$$

This matrix will be used to generate the code to be programmed into the robot to reproduce a human handwriting

C. Pose of the pen

The information provided by the digital tablet can be considered as the coordinates of the point in p_x and p_y and whether or not it touches the paper, that is, in some way the coordinate p_z. The digital tablet also provides the orientation in azimuth (θ) and tilt (φ) format. Therefore, each point of the tablet has the following information:

$$p_p\left(i\right) = \left(p_x, p_y, p_z, \theta, \varphi\right) \tag{5}$$

This point is referred to the CF $\{S_T\}$, as shown in Figure 4. The first step is to transform each point from the tablet format to the homogenous transformation matrix format. For this purpose, the position is given by p_x, p_y and p_z, and for the orientation the procedure is that by means of turns, the $\mathbf{Z}_T$ axis must fit the $\mathbf{Z}_p$ axis.

Analyzing the Figure 4, it is observed that by turning the coordinate frame $\{S_T\}$ an angle $-\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)$ on the $\mathbf{Z}_T$ axis and then rotating an angle $-\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)$ on the resulting $\mathbf{Y}_T$ axis, the objective is achieved. Multiplying this matrix and the matrix (3), that relates the tablet to the base of the robot, it is obtained the homogeneous transformation matrix (6) for each point, which relates the tip of the pen to the base of the robot, and where $c(x) = cos(x)$ and $s(x) = sin(x)$

$$^{R}T_{p}\left(i\right) =$$

$$\begin{pmatrix} c\left(\theta\right)s\left(\varphi\right) & -s\left(\theta\right) & c\left(\theta\right)c\left(\varphi\right) & p_{Tx} - p_y \\ -s\left(\theta\right)s\left(\varphi\right) & -c\left(\theta\right) & -s\left(\theta\right)c\left(\varphi\right) & p_{Ty} + p_x \\ c\left(\varphi\right) & 0 & -s\left(\varphi\right) & p_{Tz} + p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{6}$$

The students must obtain the orientation of the pen in the quaternion format by using the matrix 6. Therefore, they can generate their own code, because for each point in the homogeneous transformation matrix format, they can generate their corresponding point referred to the base of the robot. Similarly, they can proceed with the orientation of the pen in the quaternion format. That way the format of each point is obtained by the following expression:

$$^{R}p_p\left(i\right) = \left(\left[p_{ix}, p_{iy}, p_{iz}\right], \left[q_{i1}, q_{i2}, q_{i3}, q_{i4}\right]\right) \tag{7}$$

D. Programming the robot

The handwriting is programmed in the robot by using the Robotstudio software for ABB robots. This software use an own programming language named RAPID language [5]. Because the sampling points in which the handwriting is divided are very close to each other, they were joined using straight lines. It is worthy pointing out that it can be set the robot to joint the points in circular trajectories. Circular trajectories would be useful for joining more separated sampling points in the handwriting, for example.

The RAPID has a command for writing straight lines that has the following format:

MoveL [$[p_x, p_y, p_z]$,$[q_1, q_2, q_3, q_4]$,$[-1, 0, 0, 0]$, [9E9, 9E9, 9E9, 9E9, 9E9, 9E9]], v60, fine, MyPen\WObj:=wobj0;

The most important parameters are the following; the others will be left as they are:

- $[p_x, p_y, p_z]$: target point, (the origin point is where the tip of the pen is located).
- $[q_1, q_2, q_3, q_4]$: Orientation of the pen in quaternion format.
- v60: indicates the speed in this case indicates 60 mm / s.
- fine: indicates that the end point is reached with maximum precision.
- MyPen\WObj: = wobj0: Indicates the tool used, in the case studied is the pen.

Therefore the student should carry out a program, having all sampling points of the handwriting in the format given by (7). Then, they should write the required code to generate the straight lines in RAPID format. Once this file is generated, it can be downloaded into the robot and can be executed. The robot, therefore, execute the signature with the pen on the tablet. Once the signature is made, the signature file generated by the tablet will be stored in the computer.

III. Digitalization of the handwriting using a tablet

To acquire handwriting, current technology allows, among others, two well-known and accepted methods. On the one hand, through a paper and a pen and, on the other hand, through a digital tablet. The first case is called static handwriting and the second dynamic handwriting.

Static writing is more used in our society than dynamic writing. However, both are equally accepted. In general terms, people sign indistinctly both on paper (e.g. classroom assistance) and on a digital tablet (e.g. validation of a credit card during a commercial transaction).

From the computational point of view, the static handwriting is processed in a computer as an image with different intensity levels of color because the inked pen. Instead, dynamic handwriting consists of signals, typically of trajectory and pressure ordered according to the executed handwriting. These signals allow to know intrinsic properties to the writer, such as the duration of his handwriting, the writer's kinematics (e.g., his speed and acceleration) or the different levels of pressure throughout his handwriting. In addition, it allows us to reproduce the exact order in which the writing was made.

In our experiments, we have used handwriting signatures. The signature is a personal characteristic that is learned and practiced throughout life [6]. As such, it has been considered that the use of students handwriting signature can encourage the motivation and engagement for programming robot.

To digitize the handwriting signature, this paper proposes a method that attends the acquisition of both static and dynamic handwriting. To do this, a WACOM digital tablet is used, specifically the WACOM Intuos pro model, which allows to acquire both static and dynamic handwriting at the same time.

As most students are accustomed to signing with pen on paper, in this work an ink pen capable of communicating the dynamics of writing to a digital tablet has been used. Figure 5 shows a paper that has been placed on the digital tablet for the student to sign. The result is a static signature and a dynamic signature at the same time.

Finally, it is worth mentioning that the digitizing tablet gives the information of the pen in space, that is, its position on a writing plane and its orientation in terms of azimuth and tilt. This information will be used to programming the robotic arm.

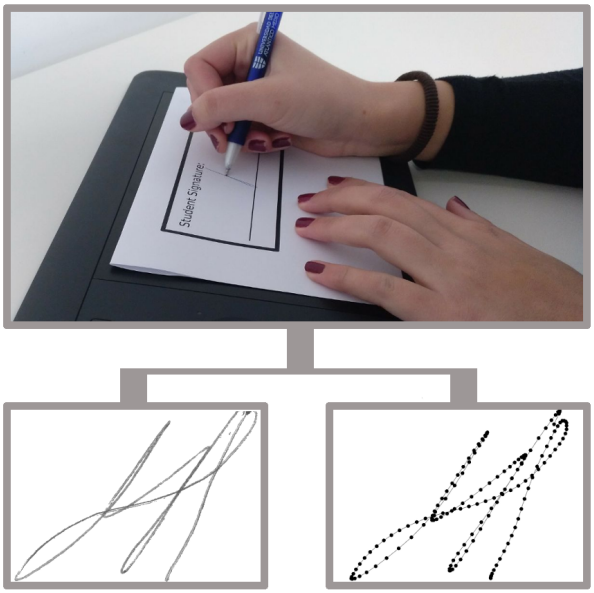


Fig. 5: Handwriting acquisition in a digital tablet. In each execution, we can acquire a static and a dynamic version of the student signature simultaneously.

IV. Experiments

Several tests were carried out with the ABB-IRB120 robot, available in the laboratory of systems engineering and automatic at the Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. In the tests, the generated handwriting consisted in handwriting signatures. For this purpose, human on-line signatures were registered with a digital tablet. Then, the robotic arm was programmed by converting the on-line signatures into a set of robotic coordinates for each signature sampling point, as it was detailed in Section 2. Later, the digital tablet was put on a table, within the writing area of the robot. A blue inked digital pen was installed in the extreme of the robotic arm. Finally, while the robot writes the signatures on the paper, they were stored in a computer. To calculate the similarity between the human and robotic signatures, the Signal-to-noise-Ratio between the trajectories was used according to the following equation, in its discrete form:

$$SNR = 10\log\left\{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[x_{sp}(i)^2 + y_{sp}(i)^2\right]}{\sum_{i=1}^{n}\left[x_{sr}(i)^2 + y_{sr}(i)^2\right]}\right\} \quad (8)$$

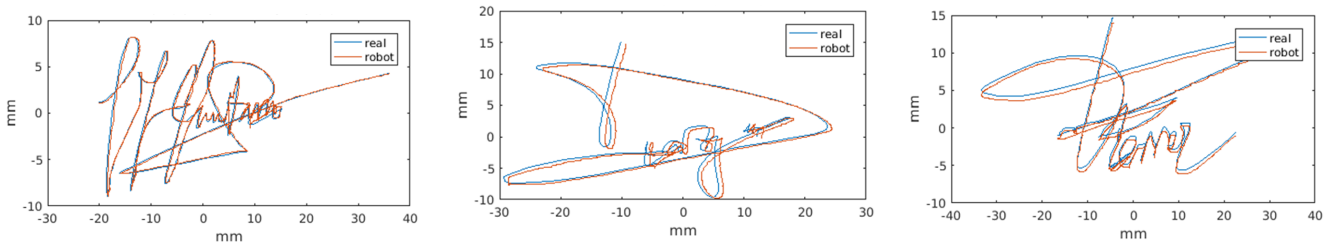
Where the numerator is $x_{sp}(i) = (x_s(i) - \overline{x}_s(i))$ and $y_{sp}(i) = (y_s(i) - \overline{y}_s(i))$. Being $(x_s(i), y_s(i))$ the student's signature's trajectory and $(\overline{x}_s(i), \overline{y}_s(i))$ its average trajectory for the horizontal and vertical axis, respectively. Instead, the denominator is $x_{sr} = (x_s(i) - x_r(i))$ and $y_{sr} = (y_s(i) - y_r(i))$, being $(x_r(i), y_r(i))$ the robot's signature's trajectory, which is evaluated with the SNR. Both pieces of handwriting were interpolated in order to ensure the same number of sampling points n, and, therefore, to make the comparison with the SNR.

On the one hand, all human signature sampling points were converted into robotic parameters, i.e. position and angles, as it is shown in (7). Because the robot tries to reach all sampling points at a low speed, its final trajectories result in stepped trajectories. For this reason, the robotic trajectories were smoother with a low pass filter in order to improve the SNR. In [7] it was studied that to the SNR should be above 15 dB for handwriting recognition purposes. However, for our purposes, the value obtained both visually and numerically satisfies the correct handwriting generation made by the robot.

For a visual validation, Figure 6 shows three signatures made by a human, *real*, and by the robotic arm, *robot*. To quantify a valid SNR for students, we executed several times these three robotic signatures. Then, we compare the SNR of each execution with the human handwriting.

Even though the motors in the robot leads to small noise in the signature trajectories, the narrow margin of SNR confirms the consistency of the robot to generate handwriting. In Figure 7 it is observed the SNR for different repetitions of each signature illustrated in Figure 6.

Finally, we can conclude that students can achieve the maximum punctuation in this session lab, if the final SNR



(a) Real and robotic signature 1 (b) Real and robotic signature 2 (c) Real and robotic signature 3

Fig. 6: Visual comparison between the overlapping of the real and the robotic handwriting signature's trajectories

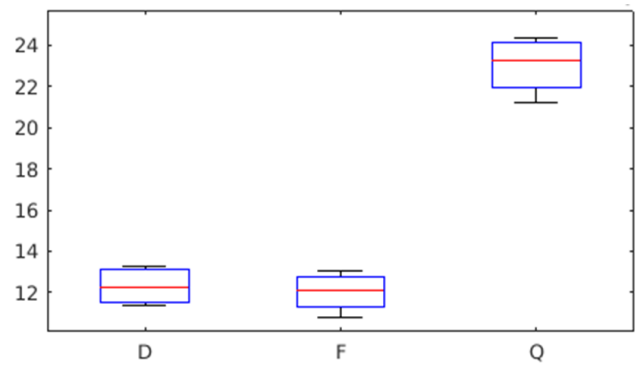


Fig. 7: Quantitative comparison between a real and several repetitions of the robotic signatures. Performance in terms of SNR.

between their handwriting and robot handwriting is above 10 dB of SNR.

V. Survey results: A pilot study

An initial survey was issue to students from the third year, enrolled in the Bachelor degree in industrial electronic and automatic engineering at the University of Las Palmas de Gran Canaria. A total of fifteen student participated in the survey.

These students completed the "control of robots" course last semester. In the lab sessions, each student programmed the robot to draw a technical drawing figure. This session was useful for developing the concepts discussed in this paper as well as to pass the theoretical questions in the exam. Thus, it is expected a meaningful judgment of these students to foresee the success of the novel lab session described in this article. Moreover, since this survey was issued after the students know their final score in the course, they did not feel under pressure to complete it.

It is worthy pointing out that additional learning outcomes will be developed in the proposal novel lab session. For example, while the pen orientation was fixed in previous lab session, the proposal one considers that the pen orientation changes during the handwriting. As this fact implies more effort for the students, it could be a matter of rejection.

The aim pursued for conducting this survey is two fold. On the one hand, to check whether the lab session that the students completed was useful to acquire the competences of the course. On the other hand, to foresee whether the novel lab session described in this article is more appealing to them than the previous one.

The survey was designed in the basis on a seven-grade Likert scale, 1 being "totally disagree" and 7 "totally agree". Obviously, the novel proposal lab session was explained to them before completing the survey. Table I shows our survey questions and results in terms of average and standard deviation.

A. Discussion

Regarding the *Block 1* results, it is observed a positive perception about the learning and skills developed in the previous lab session. The best evaluation is observed in question 1. It is an expected outcome since Q1 is related to the use of the robot.

About *Block 2*, it is clearly observed in Q5 that students prefer that the robot draws something designed by them. Moreover, Q6 suggests that varying the pen orientation when robot writes can lead to a higher motivation. This is probably due to the fact that these students were familiar with this robot. On the other hand, the average of question 4 is slightly higher of question 3. It was expected since the previous lab session did not pay special attention to the orientation of the pen.

Finally, in *Block 3*, respondents believe that a mathematical equation to compare the similarity between the original drawing and the one made by the robot, i.e. SNR, is quite positive, compare to previous method to compare through visual inspection. This is clearly observed in the Q7's score, which is slightly higher than Q6 result. Regarding question 7, the obtained average result is promising. However, in the analysis of original data, we observed that two participants scored this question with 1. This may be produced by the fact that the novel lab session involves more mental effort. As such, it makes the previous lab sessions more comfortable and faster.

To sum up, our novel proposal lab session for programing robots not only was designed for increasing the student motivation, but also for improving the learning processes behind the course. In general, the survey foresees a positive benefits and promising challenges about developing our proposal with future students.

TABLE I: Survey Results

Questions	**Average**	**Standard Deviation**
Block 1: Questions related to the previous lab session completed by the student		
Q1: Have you improved your abilities in programming the ABB robot?	6.1	0.99
Q2: Have you gain knowledge about the geometrical relationship among the different coordinate frames?	5.7	1.10
Q3: Do you feel comfortable operating with orientation systems such as quaternions, Euler angles or rotation matrices?	5.5	1.55
Block 2: Questions related to the novel lab session and the expected learning.		
Q4: Do you think that the proposal lab session would make improvements in the acquire knowledge about orientation systems such as quaternions, Euler angles or rotation matrices?	5.9	1.75
Q5: Considering that the robot has to produce a motion, would you prefer programming your own handwriting instead of a technical drawing figure assigned by the professor?.	6.7	0.70
Q6: Do you think it is appropriate for the learning process that the robot varies the orientation of the pen in a way similar to the human handwriting instead of fixing it?	6.0	1.60
Block 3: Questions related to the motivational aspects of the novel lab session.		
Q7: Would you feel pleased to compare the degree of similarity between the drawing made by the robot and the student by a mathematical formula?	6.3	0.98
Q8: Would you feel that the lab sessions will be funnier with the proposal instead of the sessions that you have already completed?	5.8	2.04

VI. Conclusions

In this paper it is proposed an innovative lab session for programming robots. In the proposal, the students interact with a robotic arm because they have to program it to produce their own handwriting. It is expected that the students use different methods to represent the position and orientation of different coordinate frames, that they program a commercial robotic arm and, that they record by means of a digital tablet the original signature and the one made by the robot. Finally, they can check both visually and numerically by means of the SNR the similarity of the signatures made by themselves and by the robot. As a summary, the students can complete many crucial requirements in programming robot course through this novel lab session.

To foresee the acceptation and motivational aspects of this novel lab session, a survey was issued to fifteen students, who completed the control of robot course last semester. They were asked to compare the lab session that they completed and the proposed one. In general terms, the students evaluated positively the fact that the robot could draw what they had previously drawn. They also evaluated accurately that not only a visual comparison of the results was required to compare the robot movement, but also a quantitative method, i.e. the SNR.

In our future works, it is planned to make more human-like the robot handwriting [8]. Currently, the robot tries to reach all ordered sampling points by setting a low velocity. Instead, people use to write fluently and rapid, specially a signature like in our tests.

VII. Acknowledgments

Authors would like to thank José Antonio Santana Segura, laboratory technician at Department of Automatic and Electronic Engineering in Universidad de Las Palmas de Gran Canaria for his support during the experiments with the ABB IRB 120 robot.

This study was funded by the Spanish government's MIMECO TEC2012-38630-C04-02 research project and European Union FEDER program/funds.

References

[1] J. M. Agudo, "La activación y mantenimiento de la motivación durante el proceso de enseñanza-aprendizaje de una lengua extranjera." *Didáctica. Lengua y Literatura*, vol. 13, p. 237, 2001.

[2] M. C. Rinaudo, M. L. de la Barrera, and D. Donolo, "Motivación para el aprendizaje en alumnos universitarios," *Revista electrónica de motivación y emoción*, vol. 9, no. 22, pp. 1–19, 2006.

[3] J. J. Craig, *Introduction to robotics: mechanics and control*. Pearson/Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, USA:, 2005, vol. 3.

[4] P. Corke, "Robotics, vision and control, volume 73 of springer tracts in advanced robotics," 2011.

[5] *Technical reference manual RAPID Instructions, Functions and Data types RobotWare 5.13, Document ID: 3HAC 16581-1 Revision: J*.

[6] M. Diaz-Cabrera, M. A. Ferrer, and A. Morales, "Modeling the lexical morphology of western handwritten signatures," *PloS one*, vol. 10, no. 4, p. e0123254, 2015.

[7] C. O'Reilly and R. Plamondon, "Development of a sigma–lognormal representation for on-line signatures," *Pattern Recognition*, vol. 42, no. 12, pp. 3324–3337, 2009.

[8] D. Berio, S. Calinon, and F. F. Leymarie, "Learning dynamic graffiti strokes with a compliant robot," in *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2016, pp. 3981–3986.

SESIÓN IV.B: INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA 2

Coordinación e Integración de Prácticas en Asignaturas de Grado en Ingeniería: Electrónica Digital y Sistemas Electrónicos

Rafael de Jesús Navas-González; Alberto Daza-Márquez; Raquel Fernández Ramos; Óscar Oballe-Peinado
Departamento de Electrónica
Universidad de Málaga
Andalucía-Tech., Málaga, España
rjnavas@uma.es; alma@uma.es; nemo@ctima.uma.es; oballe@uma.es

***Resumen*— En TAEE2016 se presentaron el planteamiento general, los objetivos, la metodología y los resultados preliminares de una experiencia docente de coordinación e integración de las prácticas de tres asignaturas de electrónica de una misma titulación de grado. Tras su despliegue durante los cursos 2015/16 y 2016/17, en esta ponencia se concretan los aspectos clave de su implementación, y se presentan y discuten los principales resultados en lo que respecta a la coordinación entre dos de esas asignaturas: Electrónica Digital y Sistemas Electrónicos. En ambas se ha constatado una mejora de los índices académicos y una valoración positiva, por parte de los estudiantes, tanto de la experiencia, como de los métodos y herramientas empleados. Estas conclusiones se basan en el análisis de la evolución que han experimentado los índices académicos, tasas de éxito y rendimiento, así como en el análisis de los datos recogidos mediante encuestas SEEQ.**

Palabras claves—mejora de la calidad docente; coordinación de prácticas; aprendizaje basado en proyectos; sistemas basados en FPGA.

I. INTRODUCCION

La coordinación entre asignaturas es una tarea compleja, y que va más allá de un acuerdo de reparto de contenidos, competencias y procedimientos de evaluación, plasmado en general en la correspondiente guía docente. Una coordinación efectiva necesita ser concretada, experimentada y testada en el aula. Con la experiencia de coordinación e integración de prácticas de electrónica presentada en [1] se ha buscado una coordinación efectiva, de forma que el estudiante pueda percibir una continuidad de métodos y contenidos en asignaturas que, en conjunto, determinan un itinerario de lo simple a lo complejo en el campo del diseño electrónico, lo que, en definitiva, debería incidir positivamente en la calidad de la docencia.

Esta ponencia se centra en presentar y compartir los principales resultados, conclusiones y lecciones aprendidas durante el despliegue e implementación de dicha experiencia, focalizando nuestra atención en dos de las tres asignaturas involucradas: "Electrónica Digital" (ED) (6 ECTS) y "Sistemas Electrónicos" (SSEE) (4,5 ECTS), ambas asignaturas obligatorias de 2º y 3º curso respectivamente, del Grado en Ingeniería Electrónica Robótica y Mecatrónica (GIERM) [2].

En este trabajo, en primer lugar, se revisan los puntos de encuentro y los elementos escogidos para la coordinación. Se recogen también las circunstancias que han determinado el contexto, y que han marcado el despliegue de la experiencia, en cada curso académico: distribución de las asignaturas en el calendario, y número y tipología de los estudiantes, así como las principales acciones de mejora realizadas tras el primer año de implantación.

A continuación, se presentan y discuten los datos que sirven de base para evaluar la experiencia. Para la evaluación del impacto en el aprendizaje se ha analizado la evolución de los índices de resultados académicos habituales (tasa de rendimiento, tasa de éxito). Para sondear la opinión de los estudiantes se han utilizado encuestas de satisfacción siguiendo el modelo SEEQ (Students´ Evaluation of Educational Quality) [3].

Finalmente se resumen las principales conclusiones, logros y propuestas de mejora.

II. DESPLIEGUE DE LA EXPERIENCIA

A. Puntos de encuentro de las asignaturas involucradas

Como se detallaba en [1], Electrónica Digital y Sistemas Electrónicos son dos de las asignaturas que constituyen la base del itinerario de electrónica de la titulación. La primera de ellas establece los fundamentos del diseño lógico (combinacional y secuencial), mientras que la segunda introduce el diseño de sistemas basado en dispositivos programables (FPGA) y sistemas empotrados: microcontroladores y DSP. Con anterioridad a la puesta en marcha de esta experiencia, en las prácticas de cada asignatura se abordaban problemas y proyectos de diseño que obviaban la natural conexión que existe entre ambas; circunstancia ésta que, sin duda, se transmitía a los estudiantes. El nexo común, por el que los estudiantes podían apreciar una conexión, era el empleo de un mismo entorno de desarrollo basado en FPGA (Digilent Nexys 3 Spartan 6 de Xilinx) [4], de modo que el estudiante daba sus primeros pasos en el uso de la herramienta en ED y ampliaba y completaba sus habilidades en SSEE. Así, esta experiencia de coordinación se puso como objetivo el organizar las prácticas de ambas asignaturas desde una perspectiva más global,

seleccionando inicialmente alguna de las propuestas planteadas en SSEE, e identificando en ellas bloques funcionales que pudieran ser presentados y realizados con las herramientas y los contenidos propios de un curso de ED. Tras una revisión de los proyectos que se venían proponiendo en SSEE, se vio que la conexión más fructífera podía establecerse abordando en ED algunos de los bloques básicos que intervienen en dichos proyectos de SSEE como elementos de interfaz de usuario, y/o control y procesamiento, próximos a los periféricos [1]. Entre los bloques seleccionados se encuentran: un controlador básico de teclado matricial, contador "up/down" con y sin limitación de cuenta, generadores de señales PWM, así como diseños sencillos que traten sobre el manejo de diferentes tipos de registros, registros de desplazamiento, o elementos de interfaz tales como sincronizadores de pulsadores y/o conmutadores, etc. En ED estos elementos se integran en Prácticas Básicas guiadas y semi-guiadas, mientras que en SSEE forman parte, tanto de Prácticas Guiadas, que extienden las aplicaciones presentadas en ED, como de Proyectos de Diseño más complejos, entre los que cabe mencionar: un sistema de control de riego, un sistema de cálculo de media de magnitudes, un generador de señales por Síntesis Digital Directa, como se detalla en [1].

A modo de ejemplo, en la Fig. 1 se muestra el diagrama de bloques y el montaje final de uno de estos proyectos. Ejemplos adicionales pueden encontrarse también en [1].

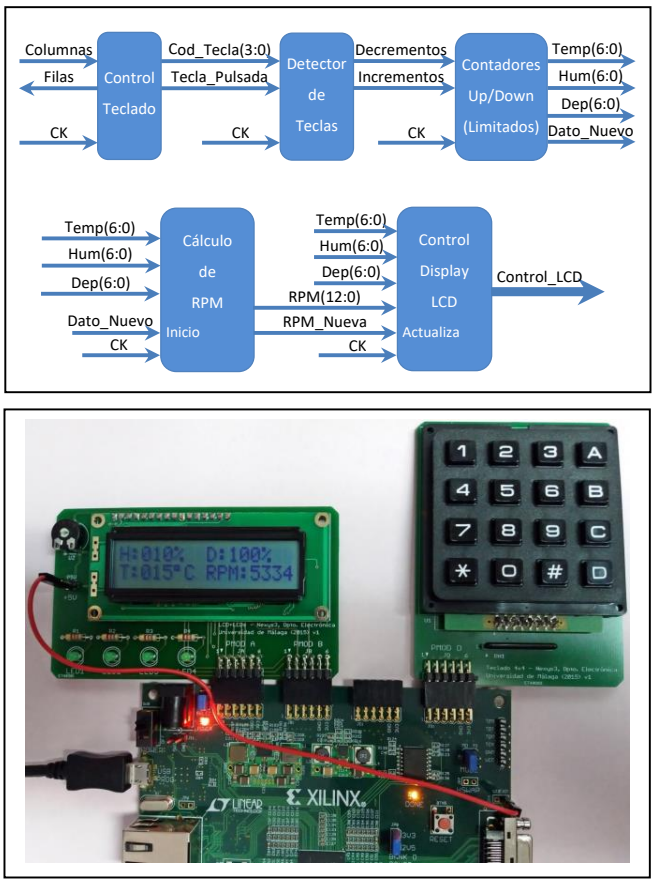


Fig. 1. Proyecto Sistema de control de riego de SSEE: Diagrama de bloques a) e implementación b)

En la actualidad se dispone de 20 placas de desarrollo Nexys 3 y numerosas placas de periféricos, muchas de ellas diseñadas en nuestro departamento, entre las que se incluyen, además de las placas de teclado y pantalla que aparecen en la Fig. 1, otras placas para el control de motores, y otros dispositivos.

B. Contexto Académico

En conjunto, durante los cursos 2015/16 y 2016/17, en la experiencia en estas asignaturas han participado 136 y 171 alumnos respectivamente, distribuidos de la siguiente manera: curso 2015/16: ED 76; SSEE 60; curso 2016/17: ED 78; SSEE 93. El número de estudiantes matriculados se ha mantenido prácticamente constante en ED, si bien el porcentaje de alumnos repetidores en el curso 2015/16 fue del 38,3%, mientras que en el curso 2016/17 descendió hasta el 24,4%, casi 14 puntos menos. Por su parte, en SSEE se produjo un notable incremento en el número de alumnos matriculados en el curso 2016/17 (55%), donde, además, una gran parte de ellos no había participado en la experiencia en ED (40,9%), bien por ser estudiantes repetidores de SSEE, o por ser estudiantes de nueva matrícula que no habían cursado ED o la habían cursado en cursos anteriores al inicio de la experiencia. Así, ambos factores han marcado el despliegue de la experiencia en SSEE durante su segunda edición, habiéndose tenido que adaptar los recursos docentes, con el consiguiente incremento en la carga de trabajo del profesorado. Sin embargo, esta circunstancia, en principio adversa, ha permitido evaluar el impacto que la experiencia produce sobre dos tipos de estudiantes.

Los principales resultados de carácter global que se aportan, y por tanto los más significativos, corresponden a aquellos estudiantes que iniciaron la experiencia durante el curso 2015/16 en la asignatura ED, y que durante el curso 2016/17 han cursado SSEE. Con ellos se ha podido contrastar el efecto de su participación en la experiencia en los dos cursos académicos, frente a los de aquellos que han cursado SSEE sin haber participado previamente en la experiencia en ED.

C. Acciones de mejora incorporadas durante el curso 2016/17

Como consecuencia del análisis de los resultados obtenidos con la experiencia durante el curso 2015/16, para el curso 2016/17 se llevaron a cabo las acciones de mejora que a continuación se detallan.

En ED, para atender a la demanda de los estudiantes (ver TABLA VI. - cuestiones 13 y 14) se realizó una revisión tanto de los enunciados como de los contenidos de las Prácticas Básicas, tratando de especificar más claramente las tareas concretas que el estudiante debía realizar. Además, con el ánimo de responder a la opinión mayoritaria de los estudiantes en relación con la elevada carga de trabajo que les había supuesto las prácticas (ver TABLA IX. - cuestiones 35 y 36) así como favorecer la coordinación entre teoría y práctica (ver TABLA VI. - cuestión 15), para el curso 2016/17 se optó por cambiar el esquema inicial: 5 Prácticas Básicas + proyecto (12 sesiones de 1,5 horas), ambos obligatorios para todos los estudiantes, por el de exigir como obligatorias las Prácticas

Básicas sólo a los estudiantes de nueva matrícula y repetidores que no las hubieran superado en el curso anterior; y ofrecer los proyectos sólo a aquellos estudiantes repetidores que las hubieran superado, como manera de mejorar la calificación de aprobado que conllevaba su convalidación. Esta última medida llevó aparejada una modificación en el peso con el que la calificación de las prácticas contribuía a la calificación final de la asignatura, pasando ésta del 30% del curso 2015/16, al 20% durante el curso 2016/17. Este es un factor que se ha de tener en cuenta al analizar y valorar la evolución de los índices de resultados académicos y calificaciones medias.

En SSEE, la principal acción de mejora llevada a cabo ha ido encaminada a paliar la notable bajada en la tasa de rendimiento que se experimentó durante el curso 2015/16, inferior incluso a la del curso 2014/15 (ver TABLA III.). Esta mejora, introducida en el curso 2016/2017, ha supuesto una de revisión de las propuestas de proyectos, adoptando un planteamiento más realista y menos ambicioso que el inicial, más acorde con las circunstancias del curso; y que ha reducido sustancialmente la carga de trabajo exigida a los estudiantes. Así, se ha pasado de la propuesta de proyectos más abiertos, presentadas durante los cursos 2014/15 y 2015/2016, que llevaron a muchos estudiantes a abandonar la asignatura, a la propuesta de un conjunto de prácticas semi-guiadas, que iban creciendo en complejidad y reutilizaban muchos de los módulos presentados en ED. Todo ello ha contribuido al éxito en la realización del proyecto final, y la mejora sustancial en los índices. La utilidad práctica de esta estrategia de prácticas semi-guiadas ha sido demostrada en [5] .

III. Resultados Y Discusión

En esta sección, en primer lugar se contempla el impacto de la experiencia en los índices de resultados académicos empleados habitualmente como una medida de la facilidad con la que los estudiantes superan las asignaturas. A continuación, se resumen y comentan los datos recogidos en las encuestas SEEQ que permiten estimar el grado de satisfacción de los estudiantes con la experiencia.

A. Resultados académicos: Electrónica Digital

La TABLA I. muestra los principales índices académicos de la asignatura: número de alumnos participantes, tasa de éxito (número de alumnos aprobados sobre presentados), tasa de rendimiento (número de alumnos aprobados sobre matriculados).

En ED la mejora en ambas tasas es más importante al inicio de la experiencia, esto es, al comparar los índices de los cursos 2014/15 y 2015/16.

TABLA I. Electrónica Digital: Índices académicos

Curso Académico	**Índices**		
	Nº de Estudiantes	***Tasa de Rendimiento***	***Tasa de Éxito***
2016/17	78	61,5%	77,4%
2015/16	76	63,2%	80,0%
2014/15	79	48,1%	60,3%

TABLA II. Electrónica Digital: Indices académicos en estudiantes de 1º Matrícula

Curso Académico	**Índices**		
	Nº de Estudiantes	***Tasa de rendimiento***	***Tasa de Éxito***
2016/17	59 (75,6%)	66,1%	81,3%
2015/16	51 (67,1%)	58,8%	62,5%

Sin embargo, en la serie de datos de los dos cursos comprendidos en esta experiencia (2015/16 2016/17) se registra un ligero descenso en el segundo año, que, si bien en términos absolutos apunta a una consolidación de resultados respecto a los del curso 2014/15, en términos relativos constituye una ligera corrección a la baja de las expectativas que merecería la pena analizar con más detalle. A este respecto resulta esclarecedor evaluar estos índices eliminando el factor alumnos repetidores que recoge la TABLA II. Así, durante el curso 2015/16 el porcentaje de alumnos de primera matrícula fue del 67,1%, y las tasas de rendimiento y de éxito para este grupo de estudiantes del 58,8% y 62,5% respectivamente. Por su parte, durante el curso 2016/2017 el porcentaje de estudiantes de primera matrícula fue 75,6%, más de 13 puntos superior, y sus tasas de rendimiento y de éxito del 66,1% y 81,2%, respectivamente. La primera casi 8 puntos por encima, y la segunda casi 20 puntos; y, en ambos casos, superiores a las tasas de la asignatura en conjunto.

Estas cifras apuntan claramente hacia un impacto positivo de la experiencia, principalmente en los alumnos de primera matrícula y teniendo en cuenta además el cambio en el sistema de calificación introducido, que reducía la contribución de las prácticas a la calificación final. Por otra parte, si comparamos estos datos con los índices de resultados del título, publicados en [2] (curso 2014/15: tasa de rendimiento 60,13%; tasa de éxito 75,82%; curso 2015/16: tasa de rendimiento 65,30%; tasa de éxito 79,49%), vemos cómo los índices de ED, que estaban por debajo de los del título en el curso 2014/15, convergen a los del título en curso 2015/16, lo que apunta de nuevo hacia el impacto positivo de la experiencia de coordinación. Sin embargo, estos índices sólo son una medida de la facilidad con que los alumnos superan las asignaturas, y no tanto de la calidad del aprendizaje. Para valorar este aspecto es necesario incorporar más factores. Entre ellos, quizá sea conveniente contemplar, por ejemplo, la distribución de calificaciones entre los alumnos que aprueban la asignatura, o de forma agrupada, la evolución de la nota media de los aprobados.

A este efecto, la Fig. 2 muestra la evolución de la media de la calificación final de la asignatura ED en la convocatoria de junio, así como la de las dos componentes de dicha calificación: la nota del examen, y la de evaluación continua. Esa última integra a su vez la calificación del trabajo de prácticas, junto a la calificación de otras actividades y/o exámenes parciales. La gráfica muestra cómo el incremento del número de aprobados que se produce en los cursos 2015/16 y 2016/17 respecto al curso 2014/15 no se corresponde con un incremento en la media de sus calificaciones, más bien al contrario.

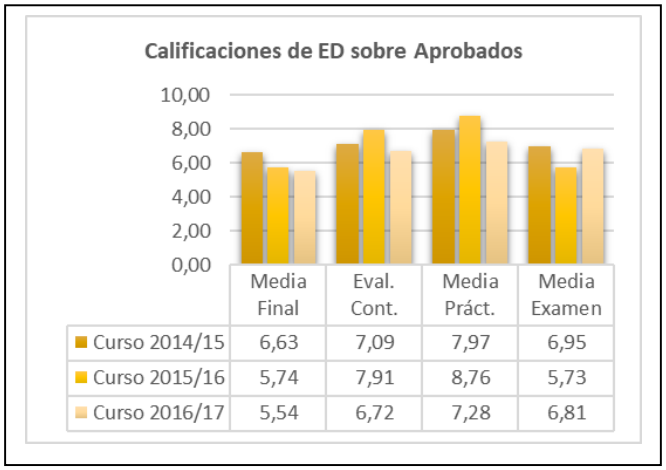


Fig. 2. Evolución de la media de las calificaciones finales sobre aprobados de la asignatura ED y de la de sus diferentes componentes.

La gráfica ilustra también la influencia de los cambios introducidos en el curso 2016/17, donde se redujo la ponderación del trabajo de prácticas respecto del curso 2015/16 y se incrementó el peso de los exámenes parciales.

Estas cifras, si bien no concluyentes, cuestionarían y modularían el impacto de la experiencia sobre la calidad del aprendizaje.

B. Resultados académicos: Sistemas Electrónicos

La TABLA III. muestra los principales índices académicos de la asignatura SSEE.

En SSEE el arranque de la experiencia en el curso 2015/16 supuso un retroceso en los índices respecto al curso 2014/15. Sobre todo, en la tasa de rendimiento. Creemos que la razón de esto habría que buscarla, por una parte, en la novedad de la propuesta, y por otra, en un planteamiento inicial quizá demasiado ambicioso, con una propuesta de proyectos abiertos y no completamente detallada, y que exigía un mayor esfuerzo del estudiante. Esta circunstancia llevó a muchos estudiantes a abandonar la asignatura sin finalizar el trabajo práctico exigido. Sin embargo, tras las acciones de mejora implementadas, la subida de ambos índices académicos es notable en el curso 2016/17, especialmente la tasa de rendimiento, a pesar de las circunstancias adversas, con una masificación en las clases y un alto porcentaje de estudiantes que, por diversas circunstancias, no habían cursado ED en el curso 2015/16 (40,9% de los alumnos matriculados).

TABLA III. SISTEMAS ELECTRÓNICOS: ÍNDICES ACADÉMICOS

Curso Académico	**Índices**		
	Nº de Estudiantes	***Tasa de Rendimiento***	***Tasa de Éxito***
2016/17	93	82,8%	88,5%
2015/16	60	38,3%	76,7%
2014/15	36	55,6%	100%

TABLA IV. SISTEMAS ELECTRÓNICOS: INDICES ACADÉMICOS DEL CURSO 2016/17 DESAGRUPADOS

Curso Académico 2016/17	**Índices**		
	Nº de Estudiantes	***Tasa de Rendimiento***	***Tasa de Éxito***
Cursaron ED en 2015/16	55 (59,1%)	87,3%	94,1%
No cursaron ED en 2015/16	38 (40,9%)	73,7%	80,0%

Creemos que hay dos factores que han contribuido a esta mejora: (1) el replanteamiento de la propuesta, con la inclusión de prácticas semi-guiadas, y el esfuerzo realizado en la revisión del material docente; (2) el impacto de la experiencia en los estudiantes tras su paso por ED, puesto que el 59,1% de los matriculados en SSEE en el curso 2016/17, ya había pasado por la experiencia en ED el curso 2015/16.

De esta circunstancia da muestra el análisis por separado de los índices de estos dos grupos de estudiantes, que se recogen en la TABLA IV. En ella se aprecia una importante mejora en los índices de los dos grupos respecto al curso anterior, en gran medida a consecuencia de (1), pero también, mejores índices en el grupo de los que cursaron ED, casi 15 puntos por encima de los repetidores y casi 4 por encima de los índices para el total de estudiantes. Lo que apunta al impacto positivo del hecho de haber participado en la experiencia en ED en el curso anterior.

Por lo que respecta al impacto en el aprendizaje, como en el caso de ED, se ha recurrido a analizar la evolución de la media de las calificaciones de los estudiantes aprobados en la asignatura de SSEE. Los datos son los recogidos en la Fig. 3.

La gráfica muestra unas calificaciones con una media final alta, que prácticamente se mantiene, en el entorno de medio punto, alrededor del notable (7,00) durante el periodo considerado. Estos datos, como en el caso de ED, muestran también que el crecimiento notable en las tasas de rendimiento y de éxito no ha supuesto una mejora sustancial en la media de las calificaciones finales de la asignatura. Lo que, como ya se ha indicado, cuestionaría y modularía el impacto de la experiencia sobre la calidad del aprendizaje.

Lo que sí parece claro es que la revisión en el planteamiento de las prácticas, que se ha llevado a cabo, ha permitido incrementar la tasa de rendimiento de la asignatura; al reducir el porcentaje de alumnos que dejaban de seguir el curso por no ser capaces de completar el trabajo práctico.

C. Opinión de los estudiantes

Para recoger la opinión de los estudiantes se han utilizado encuestas anónimas, basadas en el modelo de encuestas SEEQ, que se presentaron, empleando los recursos del campus virtual (Moodle), al final del periodo lectivo de cada asignatura y tras la publicación de las calificaciones finales definitivas.

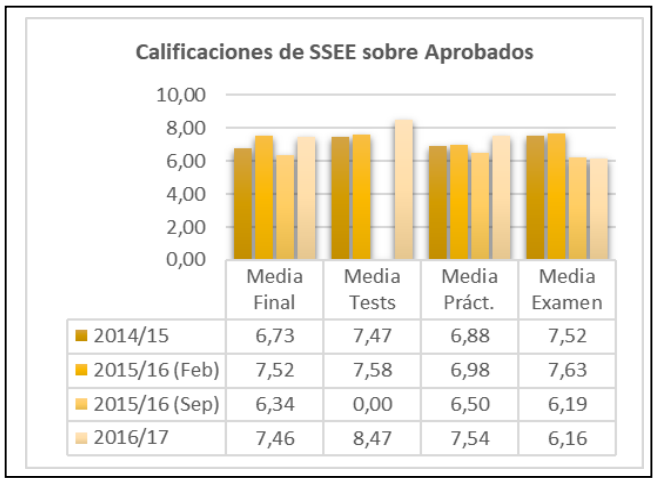


Fig. 3. Evolución de la media de las calificaciones finales sobre aprobados de la asignatura SSEE y de la de sus diferentes componentes.

En ED se tienen datos de las encuestas del curso 2015/16 y 2016/17 en las que participaron 29 y 16 estudiantes respectivamente, esto es un 38,1% y 20% respectivamente de los alumnos matriculados. La razón de esta baja participación podría estar en la fecha en las que se solicitó la participación de los estudiantes (ya entrado el mes de julio, dado que ED se imparte en el segundo semestre).

Por su parte, en SSEE sólo se tienen resultados de la opinión de los estudiantes para el curso 2016/17. En ella participaron 50 estudiantes, un 53,7% de los estudiantes matriculados. La encuesta se pasó a los estudiantes entre febrero y marzo (SSEE se imparte en el primer semestre), lo que justificaría, de alguna manera, la mayor participación.

La encuesta presentada a los estudiantes organiza las preguntas en diversas categorías que hacen referencia a la valoración de diferentes aspectos de la asignatura impartida y del profesor que la imparte. En general, para la valoración de cada cuestión se utiliza una escala de Likert con un rango de 1 a 5, con un significado de “en nada de acuerdo - 1”, y muy de acuerdo – 5”, cuando no se indica de otra manera.

Los principales resultados se reúnen en las tablas de la V a la X. Las principales categorías empleadas son:

- Valoración de la asignatura en su conjunto en cuanto a aprendizaje y organización (TABLA V.)
- Valoración de las prácticas y proyectos en cuanto a aprendizaje y organización (TABLA VI.)
- Valoración de la actitud y grado de satisfacción de los estudiantes (TABLA VII.)
- Valoración de los métodos de evaluación (TABLA VIII.)
- Valoración de la carga de trabajo (TABLA IX.)
- Valoración global, en su contexto, de la asignatura y del profesor (TABLA X.)

A continuación, y tras su análisis, haremos un resumen y valoración de los aspectos, a nuestro juicio, más destacados.

TABLA V. ENCUESTA SEEQ: VALORACIÓN DE LA ASIGNATURA EN SU CONJUNTO

Cuestiones	**Aprendizaje y organización**		
	ED 15/16	***ED 16/17***	***SSEE 16/17***
1. El contenido del curso me ha parecido intelectualmente estimulante e interesante.	3,7	4,1	4,1
2. He aprendido cosas que considero valiosas.	4,0	4,3	4,3
3. Mi interés por la electrónica ha aumentado como resultado de este curso.	3,4	3,7	3,7
4. La materia se ha presentado de forma ordenada y coherente.	3,0	3,6	4,0
5. El material de la asignatura estaba bien preparado y se ha explicado de forma cuidada.	3,1	3,5	3,9
6. Los objetivos anunciados coincidieron con lo que realmente se enseñó, de forma que siempre he sabido hacia dónde iba la asignatura.	3,4	3,5	3,9

TABLA VI. ENCUESTA SEEQ: VALORACIÓN DE LAS PRÁCTICAS EN SU CONJUNTO

Cuestiones	**Aprendizaje y organización**		
	ED 15/16	***ED 16/17***	***SSEE 16/17***
7. Las prácticas propuestas y el trabajo desarrollado en ellas me ha parecido intelectualmente estimulante.	3,7	3,9	4,2
8. Con las prácticas he aprendido cosas útiles que me han ayudado a seguir la asignatura.	3,7	4,1	4,4
9. El trabajo desarrollado en las prácticas ha sido importante para aprobar la asignatura.	3,4	3,1	4,5
10. Lo que he aprendido en estas prácticas me será útil en otras asignaturas de la carrera.	3,9	3,7	4,2
11. Mi interés por la electrónica ha aumentado como consecuencia de las prácticas.	3,6	3,5	4,1
12. Las prácticas cubren los principales contenidos de la asignatura.	3,8	4,1	4,4
13. Los guiones de prácticas son completos, recogen los objetivos y especifican claramente la tarea que hay que desarrollar.	2,7	3,0	4,1
14. Las sesiones de prácticas están bien programadas. Su número y duración son correctos en comparación con el global de la asignatura.	1,9	2,1	3,2
15. Hay buena coordinación entre la teoría y las prácticas.	1,7	2,6	4,0
16. El laboratorio está bien equipado y dispone de los recursos materiales necesarios.	4,3	4,5	4,0
17. El empleo de una plataforma de diseño como la Nexys3 resulta estimulante y adecuada para las prácticas.	4,1	4,1	4,3
18. Los contenidos de las prácticas parecen asequibles.	3,0	3,3	3,9
19. La carga de trabajo es adecuada.	2,0	2,6	2,9
20. El seguimiento y apoyo del profesor en el laboratorio es suficiente para cumplir los objetivos de cada práctica.	2,5	2,8	3,7

TABLA VII. ENCUESTA SEEQ: ACTITUD Y GRADO DE SATISFACCIÓN

Cuestiones	Actitud y Grado de Satisfacción		
	ED 15/16	*ED 16/17*	*SSEE 16/17*
21. Estoy motivado con la asignatura. Sigo habitualmente las clases y las llevo al día.	3,2	3,8	4,0
22. Preparo con antelación el trabajo de cada sesión de laboratorio y resuelvo mis dudas.	3,7	3,4	3,5
23. Considero que la materia que se imparte es de interés para mi formación.	4,1	4,4	4,3
24. En general estoy muy satisfecho con las prácticas de esta asignatura.	3,0	2,9	4,0
25. Comparativamente, he dedicado más esfuerzo a esta asignatura que a otras.	3,9	3,7	2,9
26. No estaba motivado con la asignatura, pero las prácticas lo han logrado motivarme.	2,7	3,0	3,0
27. El trabajo de prácticas ha resultado más fácil de lo que esperaba.	2,3	2,6	2,7

TABLA VIII. ENCUESTA SEEQ: EVALUACIÓN Y EXÁMENES

Cuestiones	Evaluación y exámenes		
	ED 15/16	*ED 16/17*	*SSEE 16/17*
28. Los métodos de evaluación de esta asignatura han sido equitativos y adecuados.	3,3	3,2	4,1
29. Los contenidos de los exámenes han evaluado los contenidos del curso de acuerdo con el énfasis que puso el profesor en cada tema.	3,2	3,3	4,2
30. Los criterios de evaluación de las prácticas están bien definidos. Se publicaron y se explicaron al comienzo del curso.	3,5	3,9	3,6
31. El procedimiento de revisión y evaluación de cada práctica ha sido adecuado.	3,4	3,8	3,5
32. Dada la carga de trabajo, la contribución de la calificación de las prácticas a la calificación global de la asignatura me parece adecuada.	2,7	2,9	4,0
33. Estoy satisfecho con el trabajo realizado y la calificación obtenida en las prácticas.	3,7	3,2	3,7
34. He aprobado la asignatura.	3,9	4,1	4,6

TABLA IX. ENCUESTA SEEQ: CARGA DE TRABAJO

Cuestiones	Carga de Trabajo		
	ED 15/16	*ED 16/17*	*SSEE 16/17*
35. Comparada con otras, esta asignatura ha sido: 1 muy difícil – 5 muy fácil.	1,7	1,8	2,7
36. Comparada con otras, la carga de trabajo de esta asignatura ha sido: 1 muy grande – 5 muy pequeña.	0,8	0,9	1,9
37. El ritmo de la asignatura ha sido: 1 muy rápido – 5 muy lento.	1,8	1,6	2,9

Como conclusión general cabe destacar la valoración positiva que los estudiantes hacen de la experiencia (TABLA V. - cuestiones 1 y 2; TABLA VII. - cuestiones 23, 24, 33; TABLA X. - cuestiones 38 y 40).

TABLA X. ENCUESTA SEEQ: VALORACIÓN GLOBAL

Cuestiones	Valoración Global		
	ED 15/16	*ED 16/17*	*SSEE 16/17*
38. En comparación con otras asignaturas que he cursado, esta asignatura me ha parecido …	3,5	3,6	4,0
39. En comparación con otros profesores, este profesor me ha parecido …	3,1	3,0	3,9
40. Desde un punto de vista general, esta asignatura me ha parecido …	3,7	3,8	4,0
41. Desde un punto de vista general, este profesor me ha parecido …	3,1	2,9	3,9

Para la mayoría de ellos, independientemente de la asignatura, las prácticas y proyectos les parecen adecuados e intelectualmente estimulantes (TABLA VI. - cuestiones 7 y 8), y que, así mismo lo es, el empleo de la plataforma de desarrollo Nexys3 (TABLA VI. - cuestiones 16 y 17), lo cual ha contribuido también a aumentar su interés por la electrónica (TABLA VI. - cuestión 11).

Consideran que el trabajo desarrollado ha contribuido en buena medida a superar la asignatura (TABLA VI. - cuestión 9) y que, en general, los conocimientos adquiridos les serán útiles para el resto de las asignaturas (TABLA VI. - cuestión 10).

Las propuestas prácticas les parecen asequibles (TABLA VI. - cuestión 18), aunque también destacan una mayor carga de trabajo respecto a otras asignaturas (TABLA VI. - cuestión 19; TABLA VIII. - cuestión 27; y TABLA IX.)

En cuanto a la organización (TABLA VI. - cuestiones 12 a 15), en general están satisfechos en SSEE. Las principales críticas se centran en la asignatura ED, en las que manifiestan su desacuerdo con respecto a su número y duración, y con el esfuerzo de coordinación entre teoría y práctica que se les pedía. Este último aspecto, del cual ya era consciente el profesor, junto con el número de prácticas y su temporización, fueron revisados en la segunda edición del curso, como se ya se ha indicado, y aunque la encuesta refleja cierta mejoría, la opinión dominante sigue ahí. Téngase en cuenta que durante el curso 2015/16 se pidió a los estudiantes realizar 5 prácticas básicas guiadas y completar un proyecto de diseño, mientras que durante el curso 2016/17 se suprimió la obligatoriedad del proyecto de diseño, que se dejó como trabajo optativo para aquellos estudiantes repetidores que durante el curso 2015/16 habían completado con éxito las prácticas básicas.

Sin embargo, al valorar estos argumentos en su conjunto, habría que tener en cuenta que ED es el primer curso en el que los estudiantes se enfrentan a esta metodología de trabajo, y a las herramientas de diseño, lo que sin duda supone una dificultad añadida.

Por lo que respecta a la evaluación del trabajo de los estudiantes en la asignatura, mayoritariamente consideran que los métodos y criterios son equitativos, aunque en ED se manifiestan que el peso de las prácticas en la calificación final de la asignatura no se adecúa al esfuerzo realizado (TABLA VIII. - cuestiones 31 y 32).

Finalmente, en la valoración global, los estudiantes destacan muy positivamente SSEE, y se muestran aceptablemente satisfechos con ED (TABLA X.)

Por otra parte, merece también la pena analizar la opinión de los estudiantes que cursaron SSEE en el curso 2016/17 sobre algunas cuestiones relativas al aprendizaje, discriminando en función de su participación o no en la experiencia en ED en el curso 2015/16. Los resultados de las cuestiones que les fueron planteadas se recogen en la TABLA XI. Los encuestados consideran que su paso por la experiencia en ED les ha ayudado a afrontar mejor las prácticas y proyectos propuestos en SSEE. Además, manifiestan que el grado de conocimiento sobre el análisis y diseño de sistemas digitales, como del manejo de las herramientas CAD (Computer Aidded Design), es superior en los que siguieron la experiencia en ED. Estas opiniones apuntan, una vez más, hacia una valoración positiva de la experiencia.

TABLA XI. ENCUESTA SEEQ: CUESTIONES PARA ESTUDIANTES DE SSEE. SEGÚN SU PARTICIPACIÓN O NO EN ED

Cuestiones	**Aprendizaje en ED**	
	Cursaron ED en 15/16	***No cursaron ED en 16/17***
42. ¿Has superado la asignatura Electrónica Digital? (ED) (1 – No, 5 – Si).	4,2	4,0
43. Los conocimientos prácticos adquiridos en ED me han ayudado ha superar Sistemas Electrónicos (SSEE).	3,4	2,5
44. El sistema de prácticas básicas + proyectos en ED me ha servido para afrontar más fácilmente las prácticas SSEE.	3,2	2,6
45. Grado de conocimientos adquiridos en ED sobre análisis de sistemas digitales (1 – muy bajo; 5 – muy alto).	3,5	3,1
46. Grado de conocimientos adquiridos en ED sobre diseño de sistemas digitales (1 – muy bajo; 5 – muy alto).	3,5	2,8
47. Grado de conocimientos adquiridos en ED sobre el manejo del software Xilinx ISE (1 – muy bajo; 5 – muy alto).	3,2	2,5
48. Grado de conocimientos adquiridos en ED sobre simulación de circuitos (1 – muy bajo; 5 – muy alto).	3,0	2,3

IV. CONCLUSIONES

A nuestro juicio, a grandes rasgos, se han cumplido los objetivos perseguidos por esta experiencia, aunque no debe darse por concluida:

- Se ha logrado especificar un conjunto de prácticas básicas y proyectos que establecen continuidad entre distintas asignaturas y que van a permitir un desarrollo progresivo de las prácticas de electrónica, mejorando, en la medida de lo posible, el reparto de la carga de trabajo práctico entre ellas.
- Se ha conseguido una mejora en los principales índices académicos.
- Se ha constatado una buena aceptación de la experiencia y un razonable grado de satisfacción por parte de los estudiantes.

Sin embargo, cabe decir aquí que, por lo que respecta al primer punto, este logro queda aún lejos del objetivo más ambicioso de definir un conjunto de proyectos que puedan ser propuestos y abordados de forma global en todas las asignaturas involucradas. Hemos experimentado que esta tarea entraña una gran dificultad, dada la extensión de conocimientos y contenidos que se abordan en las tres asignaturas seleccionadas, y el grado de madurez que se debe exigir a los estudiantes.

Por otra parte, somos conscientes de que los índices académicos utilizados, aunque habituales en los informes de evaluación de asignaturas y titulaciones, sólo son una media de la facilidad con que los alumnos superan las asignaturas, y no tanto de la calidad del aprendizaje. Estos índices están influenciados en buena medida por el sistema de evaluación empleado, por lo que el análisis debe apoyarse en más factores, entre ellos, la evolución de la media de las calificaciones. En cualquier caso, para llegar a conclusiones sólidas hará falta una serie más larga de resultados que proporcione una perspectiva más amplia.

Esperamos contribuir a superar las anteriores limitaciones, junto con los nuevos retos planteados, como parte del desarrollo del nuevo proyecto de innovación educativa PIE17-130, concedido en la nueva convocatoria 2017/2019.

Finalmente, por lo que respecta a la coordinación entre los profesores que imparten las asignaturas, consideramos que ésta ha sido satisfactoria. Al ser todos miembros del mismo departamento, la proximidad física y la sintonía personal han permitido que las reuniones de coordinación se hayan desarrollado con fluidez y eficiencia, cosa no siempre fácil en un entorno más general.

AGRADECIMIENTOS

Esta experiencia docente ha sido realizada y financiada en el marco de los proyectos PIE15-95 y PIE17-130, Proyectos de Innovación Educativa convocados por el Vicerrectorado de Personal Docente e Investigador de la Universidad de Málaga.

REFERENCIAS

[1] Rafael Jesús Navas-González, Raquel Fernández Ramos y Alberto Daza-Márquez, “Coordinación e Integración de Prácticas de Electrónica en Asignaturas de Grado en Ingeniería”. Actas del XII Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (TAEE2016); pp. 321-328; Sevilla 2-24 junio, 2016. ISBN: 978-84-608-9298-4. http://www.taee2016.org/index.php/es/actas (Último acceso abril 2018)

[2] https://www.uma.es/grado-en-ingenieria-electronica-robotica-y-mecatronica Página web del titulo (Último acceso abril 2018)

[3] H.W. Marsh, “SEEQ: A reliable, valid, and useful instrument for collecting students´evaluations of university teaching”, British Journal of Educational Psychology, vol 52, pp 77-95, Feb. 1982.

[4] http://www.xilinx.com/products/boards-and-kits/1-27b7nm.html/ Página web del producto Nexys3 de Digilent (Último acceso abril 2018)

[5] C. Quintans, J. Fariña y J. Rodriguéz-Andina, “Hand-On Learning of Digital Systems Through Semi-Guided Projects”, IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje, vol.12, Iss. 3, pp.132-140, Aug. 2017.

Curso de Instrumentación Biomédica en Ingeniería de la Salud

Rafael de Jesús Navas González
Departamento de Electrónica
Universidad de Málaga. Andalucía Tech.
Málaga, España
rjnavas@uma.es

***Resumen*— El propósito de esta ponencia es compartir una experiencia docente de impartición de contenidos de electrónica en una titulación con vocación de trasversalidad como es el Grado de Ingeniería de la Salud, que se imparte en el marco del Campus de Excelencia Internacional Andalucía Tech. En concreto, en este trabajo se discuten los principales retos y dificultades que conlleva esta tarea; y se presenta cómo se han seleccionado y cómo se han organizado los contenidos teóricos y las prácticas de laboratorio de la asignatura de Instrumentación Biomédica.**

Palabras claves—docencia en electrónica; trasversalidad; interdisciplinariedad; especialización; aprendizaje basado en proyectos, aprendizaje basado en plataformas de desarrollo.

I. INTRODUCCION

La enseñanza de la electrónica en titulaciones donde esta disciplina no constituye un leitmotiv, o eje fundamental, requiere un cuidadoso ejercicio de selección de contenidos, que aúne un rigor y un nivel de competencia que se adecúe al entorno académico y profesional, al tiempo que no provoque animadversión, e incluso odio a la materia. Este es el caso de muchas titulaciones multidisciplinares, entre las que se encuentra, sin duda, el Grado en Ingeniería de la Salud [1] (GIS). Este grado se creó con el ánimo de formar profesionales que posean una formación amplia en diferentes ramas, tanto de la tecnología como de las ciencias de la vida, que les permita participar activamente y servir de puente en la aplicación de los principios de la ingeniería al ámbito de la salud. Sin duda, la electrónica, como soporte tecnológico, es una materia que juega un papel relevante, aunque, en este contexto, necesariamente al mismo nivel que otras ramas de la tecnología, como son la mecánica, la ciencia de los materiales, la automática, la robótica, la telecomunicación, la informática, etc.

Esta ponencia cuenta la experiencia docente de impartición de la asignatura "Instrumentación Biomédica". Se trata de una asignatura obligatoria de la mención Ingeniería Biomédica, una de las tres menciones en las que se diversifica GIS. Básicamente, la asignatura se ha organizado como un curso típico de *Instrumentación Electrónica* orientado y adaptado al contexto sanitario en el que se enmarca la titulación, siguiendo la filosofía de los primeros capítulos del cásico de Webster [2], y completando los contenidos con aplicaciones basadas en microcontroladores, destacando así el importante papel que, en el ámbito de la instrumentación, ha supuesto la incorporación de estos dispositivos. Este último aspecto se desarrolla principalmente en las prácticas. Éstas se han organizado en torno a la plataforma comercial e-Health para Arduino Cooking Hacks [3], que comercializa libelium [4], que permite analizar y experimentar un amplio conjunto de sensores empleados en biomedicina, dado el carácter "*open source"* de la misma, al tiempo que constituye un ejemplo, real y asequible para los estudiantes, de interacción entre el mundo analógico de los sensores y el digital de los sistemas basados en microprocesador/microcontrolador.

En este artículo se presenta inicialmente el contexto de la asignatura dentro de la titulación y mención en la que se inscribe. A continuación, se presenta y justifica cómo se han seleccionado los contenidos, cómo se organizan y exponen, interpretando los descriptores de la asignatura recogidos en la memoria del título [5]; y finalmente, cómo se organizan las sesiones de prácticas de laboratorio. En este último aspecto se hará hincapié en el importante papel que en ellas desempeña la plataforma comercial e-Health. Por último, se presentan y analizan algunos resultados académicos, así como las opiniones de los estudiantes, recogidas a lo largo de diferentes cursos académicos mediante encuestas SEEQ (Students´ Evaluation of Educational Quality) [6], al tiempo que se reflexiona sobre ambos.

II. CONTEXTO ACADÉMICO

A. Instrumentación Biomédica en Ingeniería de la Salud

En el plan de estudios del Grado en Ingeniería de la Salud, la asignatura "Instrumentación Biomédica" (IB) (6 ECTS) —3er curso, 6º semestre—, desarrolla, junto con "Electromedicina" (EM) (6 ECTS) —4º curso, 7º semestre— una de las componentes de la *Formación específica en Ingeniería Biomédica* denominada *Instrumentos médicos*, que configura la mención del título Ingeniería Biomédica (INBM).

Según recoge la memoria del título [5]:

> *"En la primera se tratan los fundamentos del procesamiento de señales junto con las particularidades de los problemas en las aplicaciones en Ingeniería Biomédica, mientras que en la segunda se profundiza y se trata el diseño y la selección de dispositivos para aplicaciones."*

Por su parte, las competencias específicas asignadas a cada una de ellas son:

"Capacidad para aplicar técnicas existentes en el tratamiento de señales que permitan su interpretación y aplicación al ámbito de la biología y la medicina."

"Capacidad para diseñar dispositivos eléctricos y electrónicos para aplicaciones en biología y medicina."

Como ocurre en estos casos, la prescripción que se realiza en estos documentos es tan genérica que hace falta una labor de reinterpretación, y contextualización, para recoger el espíritu de sus redactores, hasta lograr un consenso que permita concretar el contenido de cada asignatura. En nuestro caso, el enfoque que pareció más adecuado fue el de seguir el esquema que proponen los manuales clásicos de instrumentación biomédica [2][7]; abordando en la asignatura de IB los contenidos de introducción a los instrumentos de medida, dispositivos de adquisición de señales (sensores), incluidos biopotenciales, y circuitos de acondicionamiento básico próximos al sensor, incluidos los de amplificación y filtrado; y dejando para EM aspectos de sistema de más alto nivel: dispositivos y equipos de medida del tipo: ECG, EMG, EEG, etc., y toda la problemática asociada a la seguridad eléctrica. También parece oportuno, dada la creciente importancia de su uso, completar los contenidos de IB, incluyendo la adquisición y procesado de señales mediante sistemas basados en microcontrolador.

Así pues, la asignatura IB se ha plantea como un curso de Instrumentación Electrónica, pero orientado al ámbito de la biomedicina y los instrumentos médicos en cuanto a las propuestas y ejemplos de aplicación. Siguiendo la definición clásica, la instrumentación electrónica:

"Es la parte de la electrónica que se encarga del diseño y manejo de dispositivos y sistemas cuya principal misión es la medición de magnitudes físicas"

o de otra forma:

"Se aplica en la adquisición mediante sensores y el procesamiento de la información proveniente de variables físicas y química, a partir de las cuales se realiza la monitorización y el control de procesos, empleando dispositivos y tecnologías electrónicas"

La capacitación en cuanto a procesado de más alto nivel de señales adquiridas por los instrumentos, incluido el procesamiento digital de la señal, se contempla y concreta en asignaturas optativas de la mención como "Bio-señales Médicas" (BioSM) —4º curso—.

B. Materias Básicas y Asignaturas relacionadas

Los contenidos básicos de electrónica, comunes a todos los estudiantes de GIS, se concreta en la asignatura "Electrónica" (EL) (6 ECTS) —2º curso, 3er semestre—. EL es una asignatura troncal, que según recoge la memoria del título [5] debe "*capacitar en el conocimiento de los fundamentos de electrónica*". Se trata pues de un curso de electrónica general en sentido amplio, que en la práctica concreta su temario abordando aspectos tanto de electrónica digital, como analógica, pasando por los dispositivos [8].

Junto a ésta, las asignaturas "Circuitos y Máquinas Eléctricas" (CYM) (6 ECTS) —también de 2º curso, 3er semestre—; "Control Automático" y "Arquitectura de Computadores y Sistemas Operativos —ambas de 2º curso, 4º semestre— completan la formación del estudiante en lo que respecta al análisis de circuitos y máquinas eléctricas, métodos de control y regulación automática y de los componentes y estructura básica de los computadores [9]. Todos son cursos generalistas que abordan los fundamentos de cada materia. Y dada la diversidad de contenidos y departamentos implicados, no está clara, ni garantizada, una orientación especifica hacia contenidos y problemas biomédicos.

Con este amplio bagaje —al menos sobre el papel, según se concreta en los temarios de cada asignatura, aunque necesariamente poco profundo y de orientación incierta en la práctica— es con el que se supone que el estudiante cuenta para afrontar el resto de los contenidos de electrónica; y el que el docente debería asumir al plantear su docencia. En concreto, en nuestro caso, un curso de IB.

III. Curso de Instrumentación Biomédica

A. Competencias y Objetivos de aprendizaje

Entre las competencias asignadas a esta asignatura podemos encontrar:

- Capacidad para analizar, evaluar, diseñar y/o seleccionar dispositivos y sistemas electrónicos para resolver problemas en las áreas de la biología y la medicina, incluyendo los sensores y transductores necesarios y más apropiados en cada aplicación.
- Capacidad para comprender el origen y las técnicas existentes para la adquisición y tratamiento de señales biomédicas.
- Capacidad para analizar un sistema mediante instrumentos de análisis y medida, para manejar herramientas de simulación y los instrumentos básicos de un laboratorio de electrónica e instrumentación.
- Desarrollar una visión general del área de la instrumentación dentro de la ingeniería biomédica

Teniendo esto en cuenta, los objetivos de aprendizaje se concretan en que los estudiantes sean capaces de:

- Identificar los principales bloques funcionales de un sistema de medida, y el papel que este desempeña en el ámbito de la biología y la medicina.
- Identificar los principales parámetros que caracterizan el comportamiento y las prestaciones de los sistemas de medida; y analizar y evaluar cuáles son sus principales requerimientos. Incluidos los criterios de diseño y normas reguladoras generales.
- Identificar las principales variables a medir, principios de transducción, sensores e instrumentos básicos empleados en este ámbito. Conocer sus principales características y cómo se emplean esos principios y sensores en la medida de variables biomédicas.
- Seleccionar y utilizar sensores resistivos, inductivos, capacitivos, piezoeléctricos, entre los habitualmente utilizados en medidas de desplazamiento, proximidad, fuerza, presión, etc.

- Seleccionar y utilizar sensores habitualmente presentes en sistemas de termometría: termistores, RTD, termopares, etc.
- Identificar los principales parámetros y caracterizar un sensor o sistema de medida, tanto en condiciones estáticas como dinámicas
- Identificar y utilizar los principales componentes, circuitos y técnicas utilizadas en la adquisición, el acondicionamiento de las señales proporcionadas por los sensores.
- Reconocer, analizar y diseñar circuitos básicos de acondicionamiento de sensores.
- Identificar el origen y características de las principales bio-señales: ECG, EMG, EEG; y de los sistemas empleados para su adquisición y acondicionamiento.
- Trabajar con las herramientas de un laboratorio de electrónica e instrumentación.
- Trabajar con sistemas empotrados para el diseño de instrumentos y aplicaciones en biomedicina.

B. Temario: Selección de contenidos

La Fig. 1 muestra un mapa conceptual con los contenidos seleccionados para alcanzar los mencionados objetivos.

Para estructurar la asignatura se han propuesto cuatro bloques temáticos:

1) Introducción a la Instrumentación Biomédica.
2) Adquisición de señales biomédicas: Sensores y transductores
3) Tratamiento de señales biomédicas: amplificación y acondicionamiento.
4) Origen y características de las principales señales biomédicas.

Con estos contenidos se trata de cubrir los nueve primeros puntos descritos en los objetivos de aprendizaje. Los dos últimos son objetivos que se cubren con las prácticas de laboratorio.

La principal dificultad estriba en concretar y presentar estos contenidos con el rigor y nivel de exigencia adecuado a la formación previa de los estudiantes, a fin de que alcancen un grado aceptable de competencias adecuado al contexto en el que vayan a desarrollar su actividad profesional.

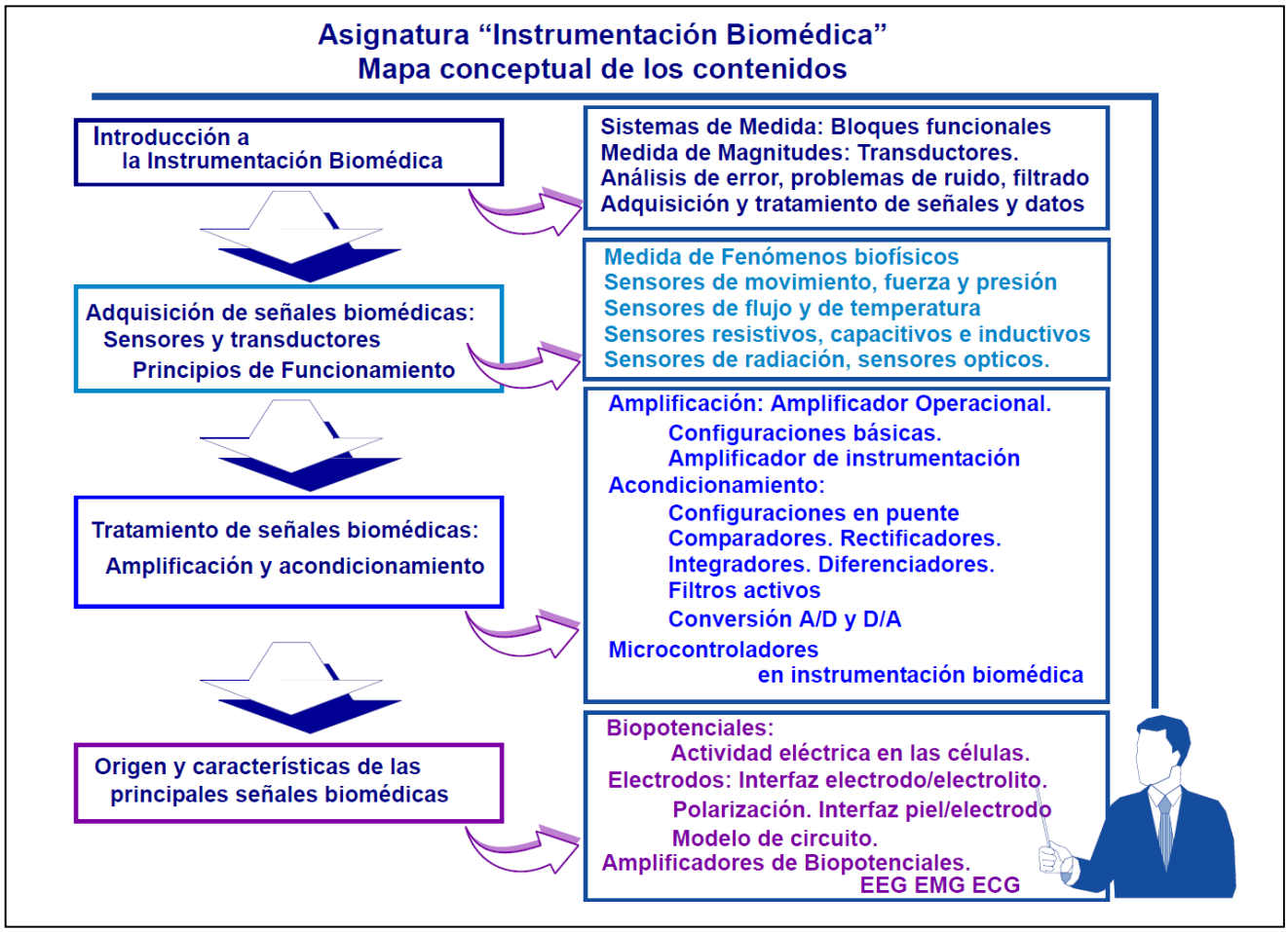


Fig. 1. Contenidos de IB: Mapa conceptual

En la sección IV.C, se discutirán los aspectos de este temario que, en la práctica docente, han resultado de especial dificultad para los estudiantes que han cursado la asignatura; y comentaremos posibles alternativas. Antes se completará la selección de contenidos de la asignatura, describiendo cómo se han organizado las prácticas de laboratorio.

C. Prácticas de Laboratorio

Como primer objetivo de las prácticas se ha propuesto que los estudiantes ejerciten una parte importante de los contenidos teóricos presentados en clase, al tiempo que profundizan en el conocimiento de las herramientas propias de un puesto de trabajo de electrónica, (generador de señales, fuente de alimentación, multímetro, osciloscopio y simuladores de circuitos (SPICE)), con las que deberían estar familiarizados tras su paso por las asignaturas EL y CYM, y que las utilicen para analizar y experimentar con los circuitos de amplificación y acondicionamiento de señales provenientes de sensores que se han presentado en clase como ejemplos de aplicaciones biomédicas.

Sin embargo, el montaje de muchos de estos circuitos en una placa de prototipos puede resultar complejo y con pocas garantías de éxito, sobre todo para estudiantes poco experimentados, lo que puede llevar a alguno de ellos a estados de frustración. En este sentido, ha resultado muy provechoso el disponer de un sistema como la plataforma comercial e-Health v 2.0 para Arduino que recoge la Fig. 2.

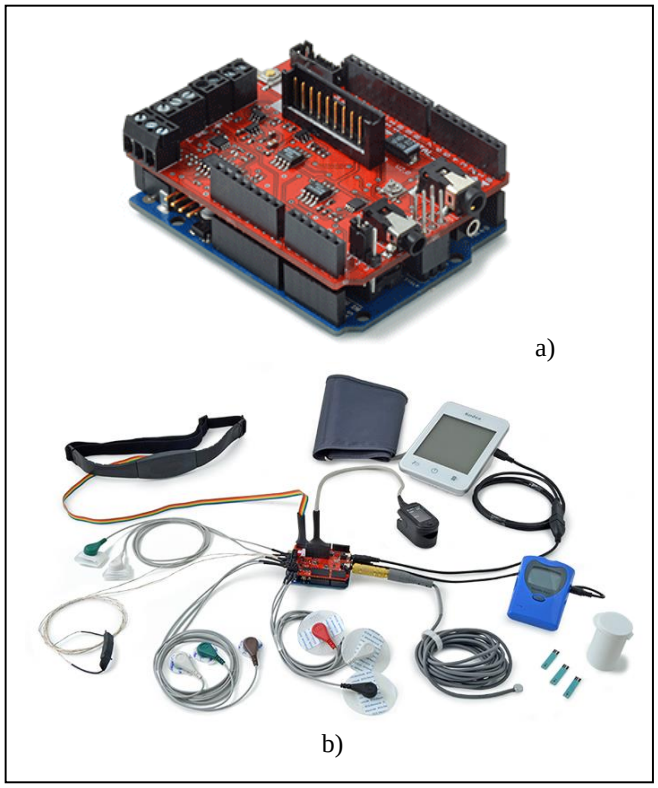


Fig. 2. Plataforma e-Health de Cooking Hacks [3], cortesia de ©Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L.[4]: Placa (“shield”) a); sensores para aplicaciones biomédicas b).

Se trata de un sistema “*open source*” tanto software como hardware, que integra en una placa (“*shield*” para Arduino) los circuitos de acondicionamiento básico, y que proporciona las librerías de programación básicas para trabajar con un amplio conjunto de sensores para aplicaciones biomédicas. La Fig. 2 a) muestra el aspecto de la placa e-Health conectada un Arduino Uno; mientras que la Fig. 2 b) se muestran todos los sensores disponibles. El Departamento de Electrónica dispone en la actualidad de 20 plataformas e-Health-Arduino y tres conjuntos de sensores.

El carácter “*open source*” de esta plataforma permite realizar un trabajo de ingeniería inversa, y, dado que algunos de los circuitos de la placa constituyen ejemplos sencillos de las técnicas de amplificación y acondicionamiento de señales presentados en clase, analizarlos con cierto detalle, mediante simulación, e incluso verificar, con el instrumental del laboratorio, algunas de sus principales características y prestaciones. Como valor añadido a estas prácticas, el uso de esta plataforma permite también proponer proyectos en los que los estudiantes pueden experimentar con diversos sensores y desarrollar ejemplos aplicaciones biomédicas dirigidas a un usuario final, al tiempo que se les introduce en el empleo, en este ámbito, de los sistemas empotrados. Esta aproximación permite cumplir con el segundo objetivo de aprendizaje asignado a las prácticas de laboratorio.

Distribuidas a lo largo del semestre, en seis sesiones de laboratorio de dos horas cada una, se han propuesto las prácticas de laboratorio que recoge la TABLA I.

TABLA I. PRACTICAS DE INSTRUMENTACIÓN BIOMÉDICA: OBJETVOS

Título	**Prácticas de Instrumentación Biomédica**
	Objetivos
P1: Instrumental de laboratorio. Medidas y Errores. (Una sesión)	- Familiarizarse con los equipos, instrumentos de medida: Fuentes de alimentación, generadores de señales, osciloscopios, multímetros, placa de montaje de prototipos. Y en su uso en medidas de componentes y circuitos. - Estimar los errores de las medidas.
P2:Simulación de Circuitos. Curva de Calibración del Sensor GRS. (Una sesión)	- Actualización en el uso de SPICE. - Análisis y simulación de un circuito GRS. - Obtención de la curva de calibración del GRS.
P3:Circuitos de Acondicionamiento. Amplificador de Instrumen tación y Filtros Activos. (Una sesión)	- Uso de SPICE para analizar, simular y caracterizar un Amplificador de Instrumentación (AI) y diversos filtros activos.
P4:Microcontroladores en aplicaciones biomédicas. Placa e-Health para Arduino. (Tres sesiones)	- Introducir las aplicaciones de los microcontroladores en biomédicina. - Familiarizarse con la plataforma e-Health V2.0 para Arduino. - Estudiar y conocer los distintos sensores con los que trabaja. - Ejercitarse con algunos tutoriales básicos. - Identificar como interacciona el *software* de las librerías e-Health para Arduino con el *hardware* de adquisición y acondicionamiento. - Experimentar con aplicaciones basadas en medidas biométricas

Para estas sesiones, el total de estudiantes se ha dividido en dos grupos, con lo que, en promedio, en los diferentes cursos académicos ha resultado una ratio alumno/profesor en torno a 18:1. Esta ratio resulta a veces elevada para satisfacer los requerimientos de los estudiantes en este tipo de laboratorio, si bien cumple con la ratio establecida por la universidad para asignaturas con similar índice de experimentalidad.

En la práctica P2 y P4 se emplean los siguientes sensores de la plataforma e-Health v 2.0:

- Sensor para estimar la respuesta galvánica de la piel GRS (*Galvanic Skin Response*).
- Sensor para medir el ritmo respiratorio (*Airflow*).
- Sensor de temperatura corporal
- Sensor para electromiografía (EMG).
- Sensor para electrocardiografía (ECG).
- Sensor de posición del cuerpo.
- Pulsioxímetro.

Los cinco primeros sirven como ejemplo concreto de diferentes sensores y circuitos de acondicionamiento, que pueden ser analizados en detalle, al tiempo que permiten desarrollar aplicaciones basadas en el procesado mediante Arduino de los datos registrados. Los dos últimos son sensores más cerrados, en los que no está accesible el *hardware* interno, y en los que la placa e-Health sólo se emplea como elemento de interfaz con el microprocesador. Por ello, estos últimos, se utilizan solo en la práctica P4 para desarrollar aplicaciones con las que el estudiante debe bucear en las librerías e-Health de Arduino, y conocer así los entresijos de la interacción *hardware/software*.

En concreto las características de estos sensores, que los hacen útiles para cubrir los objetivos de las prácticas son:

1) El sensor GRS: Utiliza dos contactos metálicos que se colocan sobre la piel de forma que la resistencia equivalente de esta se conecta a un óhmetro. Este es un ejemplo sencillo de un circuito de acondicionamiento basado en amplificador operacional (amplificador de transconductancia). Puede ser analizado, simulado con SPICE y probado el laboratorio.

También puede ser transformado, con la ayuda de una sola resistencia adicional externa, en un ejemplo de amplificador en configuración no inversora, con el que el estudiante puede experimentar con diferentes conceptos de amplificadores y sistemas presentados en la teoría, entre ellos con la respuesta dinámica de sistemas de primer orden. Resulta también muy muy útil y cómodo para proponer a los estudiantes un ejemplo práctico de obtención experimental de la curva de calibración de un sensor.

2) El sensor Airflow: Utiliza termopares para detectar las diferencia de temperatura entre el aire inspirado y expirado, de esta forma se detecta el ritmo respiratorio Su circuito de acondicionamiento es un ejemplo sencillo que exhibe un comportamiento global de filtro pasobanda activo, con una ganancia elevada, diseñado a partir de varias etapas amplificadoras y filtros, tanto activos como pasivos. Constituye pues un buen ejemplo, fácil de analizar y simular, aunque resulta más dificil de ejercitar en el laboratorio. Sí resulta útil para proponer aplicaciones con Arduino, del tipo de evaluación del ritmo respiratorio, o la construcción de una alarma que avise de una disminución del ritmo o cese de la respiración de un paciente.

3) Sensor de temperatura corporal: Utiliza como elemento sensor un termistor NTC, que es acondicionado mediante un puente de Wheatstone, y cuya tensión de salida es amplificada mediante un amplificador de instrumentación integrado (AI). Resulta pues un ejemplo muy adecuado de aplicación de los AI, puesto que reproduce el esquema típico recogido en las notas de aplicación que ofrecen los fabricantes. El sistema completo, puede ser analizado, simulado y medido con el instrumental del laboratorio. Además, permite proponer aplicaciones con Arduino, donde, además determinar el valor de la temperatura, es posible definir otras que impliquen interacción con otros sistemas de control o regulación.

4) Sensor EMG. Es un ejemplo simple de sensado y circuito de acondicionamiento de biopotenciales, capaz de detectar señales que son consecuencia de la actividad muscular. El circuito de acondicionamiento incluye varias etapas en las que intervienen diferentes circuitos estudiados en clase, entre los que se encuentran, un AI integrado, un rectificador de precisión y diversos filtros. El sistema completo, puede ser analizado, simulado y medido con el instrumental del laboratorio. Y permite proponer aplicaciones con Arduino, en las que la señal miográfica puede ser capturada para ser analizada y/o empleada para controlar diferentes dispositivos.

5) Sensor ECG. Es otro ejemplo clasico de sensor de biopotenciales, que permite registrar la actividad del músculo cardiaco. El circuito de acondicionamiento permite experimentar con diferentes circuitos estudiados, entre los que se encuentran, un AI y diversas etapas de filtrado. El sistema completo, puede ser analizado, simulado y medido con el instrumental del laboratorio. Y permite proponer aplicaciones con Arduino, en las que la señal cardiaca puede ser capturada para ser analizada y/o empleada para controlar diferentes dispositivos.

6) Sensor de posición. Este sensor está basado en un acelerómetro comercial, que se adosa a la parte movil del cuerpo que se desea monitorizar, y cuya salida, leida por el microcontrolador de Arduino gracias a la librería e-Health, son interpretada en terminos de posición. En las prácticas se ha usado para proponer aplicaciones relacionadas con la detección o monitorización de movimientos corporales, como por ejemplo la detección de caidas, o monitorización de tablas de ejercios de rehabilitación, entre otros.

7) Pulsioxímetro. Se trata de un dispositivo comercial que proporciona en su pantalla los valores del ritmo cardiaco, en pulsaciones por minuto, y el porcentaje de saturación de

oxígeno en sangre. Con el interfaz que proporciona la plataforma, estos valores son directamente leidos por Arduino, para ser utilizados en aplicaciones de monitorización o control.

D. Metodo de evaluación

Para medir la consecución de los resultados de aprendizaje, así como de las competencias generales y específicas se han empleado diferentes recursos:

1) Pruebas escritas de control y examen final. Los controles se realizan a lo largo del cuatrimestre y el examen final en la fecha establecida para convocatoria ordinaria. Estas pruebas evalúan el aprendizaje teórico, y práctico en lo que respecta a la resolución de problemas númericos de análisis y/o síntesis de circuitos.

2) Prácticas de Laboratorio. Se evalúa la participación activa en las sesiones de prácticas de laboratorio, y los documentos e informes que reflejan el trabajo allí *desarrollado*. Estas actividades evalúan el aprendizaje práctico en lo que respecta al manejo de instrumentación y evaluación de sensores en aplicaciones biomédicas.

3) Evaluación de otras actividades. Búsqueda de información, creación de documentos, exposición oral y defensa del trabajo realizado. Estas actividades evalúan además de competencias específica de materia, competenicia generales de la titulación.

La calificación final de la asignatura consta de dos componentes con la siguiente ponderación: a) calificación del examen final 60%; b) actividades de evaluación continua: controles, prácticas de laboratorio y trabajos de búsqueda de información, elaboración de informes y exposición 40%.

El peso en la calificación de las actividades de evaluación continua ha dependido de las propuestas de cada curso académico. El peso de las prácticas ha variado entre un 50% en el curso 2013/14 y 2015/16, el 75% en el curso 2014/15 y un 37,5% para el curso 2016/17.

Las actividades de búsqueda de información y exposición oral tuvieron un peso del 50% durante el curso 2013/14 y han mantenido un 25% para el resto. Finalmente, los controles periódicos se incluyeron a partir del curso 2015/16, su propósito es doble; por una parte, el de fomentar el estudio continuado de la signatura; y por otra, el de proporcionar ejemplos de cuestiones y problemas de examen. Desde entonces, esta actividad ha supuesto el 25% de la calificación de las actividades de evaluación continua.

IV. Resultados académicos y Opinión de los Estudiantes

A. Resultados académicos

La TABLA II. recoge la evolución del número de estudiantes matriculados, el porcentaje de ellos en primera matrícula (entre paréntesis), y las tasas de rendimiento y tasas de éxito de la asignatura en los cuatro cursos que lleva de andadura IB.

TABLA II. Instrumentación Biomédica: Índices académicos

Curso Académico	**Índices**		
	Nº Total de estudiantes -- % 1ª matrícula	***Tasa de Rendimiento***	***Tasa de Éxito***
2016/17	54 --- (77,8%)	42,6%	63,9%
2015/16	36 --- (83,4)	55,6%	76,9%
2014/15	39 --- (84,6%)	56,4%	73,3%
2013/14	22 --- (100%)	72,7%	80,0%

Las cifras muestran un crecimiento significativo en estos años del número de alumnos matriculados, consecuencia, por una parte, del crecimiento en el número de estudiantes, natural en una titulación que empieza a consolidarse, y por otra, del incremento de estudiantes repetidores.

Este incremento en el número de estudiantes distorsiona siempre el planteamiento general de las asignaturas, y en IB ha afectado principalmente a las prácticas de laboratorio y a alguna de las actividades de trabajo en grupo y exposición en clase.

Las cifran muestran también unas tasas de rendimiento y de éxito aceptables, en consonancia con las tasas globales de las ingenierías en la universidad en los cursos 2014/15 y 2015/16 [10]; si bien algo inferiores a las del propio título en conjunto [1], que son respectivamente: curso14/15: 65,41% y 77,23%; curso 15/16: 66,32% y 79,36%.

Dado que estas tasas son una medida de la dificultad que encuentran los alumnos para superar la asignatura, podemos concluir que, si bien en la asignatura IB podrían estar en la línea otras asignaturas de ingeniería, el hecho es que resulta ser una asignatura en la que los estudiantes encuentran más dificultad que en otras dentro de GIS. Por otra parte, la bajada notable en las cifras del curso 2016/17 debe encender las alarmas, y en conjunto debe llevar a una reflexión más profunda sobre sus causas.

B. Encuestas de valoración de los estudiantes

Siempre resulta interesante analizar, valorar e interpretar, con la debida atención y cautela, la opinión de los estudiantes. En esta sección se presentan los resultados de las encuestas de opinión realizadas durante tres de los cuatro cursos de vida de esta asignatura. (La encuesta no se pudo realizar durante el curso 2014/15).

En las TABLA III. a la TABLA XI. se resume la opinión de los estudiantes sobre diferentes aspectos de la asignatura IB por las que fueron preguntados, siguiendo el modelo de encuestas SEEQ. Los datos corresponden a cuestionaros presentados al final del periodo lectivo y tras la evaluación de la asignatura, durante los cursos 2013/14 2015/16 y 2016/17, en los que intervinieron respectivamente 6, 14, y 13 estudiantes, lo que supone un 27,3%, 38,9% y 24,1% respectivamente, de los estudiantes matriculados. En las encuestas se ha utilizado una escala Likert, de 1 a 5, con el significado habitualmente asignado a estos valores, salvo en aquellos casos que se indican explícitamente en las tablas. En las TABLA III. a la VII se reúnen los enunciados que aparecen en todas las encuestas, mientras que en las TABLAS de la VIII

a la XI se recogen enunciados que se incorporaron a la encuesta a partir del curso 2015/16.

En las TABLAS III a la VII, llama la atención cómo ha evolucionado la opinión de los estudiantes, dado que se pasa de una valoración bastante positiva en todos los ítems para el curso 2013/14, con valores, prácticamente todos por encima de 3,5 puntos, a valoraciones neutras o en algunos ítems especialmente llamativos por debajo 2,5 puntos, TABLA III. cuestiones 5 y 6 y TABLA IV. cuestión 11. Ésta última, puede entenderse por la bajada en el peso de las prácticas en la calificación final de la asignatura.

Por otra parte, la bajada general en las valoraciones resulta coherente con los datos que recoge la TABLA VI. , respecto a la carga de trabajo. Y explica en alguna medida los datos de valoración global de la asignatura que recoge la TABLA VII.

En las TABLAS VIII a la XI se han incorporado nuevas cuestiones, para conocer la opinión de los estudiantes en aspectos más concretos.

TABLA III. ENCUESTA SEEQ: VALORACIÓN DE LA ASIGNATURA EN SU CONJUNTO

Cuestiones	**Aprendizaje y organización**		
	13/14	***15/16***	***16/17***
1. El contenido del curso me ha parecido intelectualmente estimulante e interesante.	3,0	3,2	3,0
2. He aprendido cosas que considero valiosas.	4,0	3,7	3,4
3. Mi interés por la instrumentación biomédica en general, y la electrónica en particular ha aumentado como resultado de este curso.	4,0	3,4	3,0
4. La materia se ha presentado de forma ordenada y coherente.	--	3,5	2,8
5. El material de la asignatura estaba bien preparado y se ha explicado de forma cuidada.	3,7	3,2	2,5
6. Los objetivos anunciados coincidieron con lo que realmente se enseñó, de forma que siempre he sabido hacia dónde iba la asignatura.	3,8	3,4	2,3

TABLA IV. ENCUESTA SEEQ: CONTENIDO DEL CURSO

Cuestiones	**Contenido**		
	13/14	***15/16***	***16/17***
7. Los contenidos presentados en clase se adecuan al programa de la asignatura inicialmente presentado.	4,5	3,9	3,3
8. El profesor ha introducido adecuadamente el origen y fundamento de las ideas y conceptos presentados en clase.	4,2	3,3	2,7
9. El profesor exponía los avances actuales de la materia.	4,3	3,4	3,0
10. Con las actividades propuestas he aprendido cosas útiles que me han ayudado a seguir mejor la asignatura.	3,5	3,6	2,9
11. El trabajo desarrollado en las prácticas ha sido importante para aprobar la asignatura.	4,0	3,9	2,2

TABLA V. ENCUESTA SEEQ: EVALUACIÓN Y EXÁMENES

Cuestiones	**Actitud y Grado de Satisfacción**		
	13/14	***16/17***	***16/17***
12. Los métodos de evaluación de esta asignatura han sido equitativos y adecuados.	3,5	3,9	3,2
13. Los contenidos de los exámenes han evaluado los contenidos del curso de acuerdo con el énfasis que puso el profesor en cada tema.	3,8	3,4	3,1

TABLA VI. ENCUESTA SEEQ: CARGA DE TRABAJO

Cuestiones	**Carga de Trabajo**		
	13/14	***15/16***	***16/17***
14. Comparada con otras, esta asignatura ha sido: 1 muy difícil – 5 muy fácil.	2,8	2,2	1,8
15. Comparada con otras, la carga de trabajo de esta asignatura ha sido: 1 muy grande – 5 muy pequeña.	3,2	1,7	2,0
16. El ritmo de la asignatura ha sido: 1 muy rápido – 5 muy lento.	3,3	2,6	2,7

TABLA VII. ENCUESTA SEEQ: VALORACIÓN GLOBAL

Cuestiones (1-muy malo; 5 muy bueno)			
	13/14	***15/16***	***16/17***
17. En comparación con otras asignaturas que he cursado, esta asignatura me ha parecido …	3,8	3,5	3,0
18. En comparación con otros profesores, este profesor me ha parecido …	3,5	3,4	2,8
19. Desde un punto de vista general, esta asignatura me ha parecido …		3,6	2,8
20. Desde un punto de vista general, este profesor me ha parecido …	4,0	3,4	2,8

Así, la TABLA VIII. , recoge, entre otras, la opinión mayoritaria de que es necesario dedicar más tiempo a resolver problemas en clase (cuestión 22).

En la TABLA IX. se pregunta por las actividades de evaluación continua, fundamentalmente las prácticas de laboratorio, y los trabajos que son presentados a la clase en sesiones de póster. Destaca también, por una parte, la valoración muy positiva que hacen del empleo de la plataforma e-Health en las prácticas (cuestión 32). Sin embargo, son críticos, con la programación de las prácticas, la carga de trabajo que les supone, y, especialmente en curso 2016/17, con el seguimiento y apoyo del profesor en el laboratorio, consecuencia clara del incremento notable del número de estudiantes durante ese curso (cuestiones 29, 34 y 35).

TABLA VIII. ENCUESTA SEEQ: CONTENIDO DEL CURSO

Cuestiones	**Contenido**		
	13/14	***15/16***	***16/17***
21. Se ha propuesto un número suficiente de ejemplos prácticos y problemas, para que el alumno se ejercite y adquiera la formación necesaria.	--	2,9	2,7
22. En las clases se ha dedicado tiempo suficiente para resolver los problemas propuestos.	--	2,5	2,2
23. La bibliografía seleccionada es suficiente para seguir la asignatura.	--	3,5	2,8

TABLA IX. ENCUESTA SEEQ: ACTIVIDADES

Cuestiones	Tareas, Exposiciones y Prácticas de Laboratorio		
	13/14	*15/16*	*16/17*
24. Las actividades propuestas y el trabajo desarrollado en ellas me ha parecido intelectualmente estimulante.	--	3,6	3,1
25. Lo que he aprendido en las prácticas me será útil en otras asignaturas de la carrera.	--	3,8	3,4
26. Mi interés por la instrumentación electrónica ha aumentado como consecuencia de las prácticas.	--	3,7	3,2
27. Las practicas cubren los principales contenidos de la asignatura.	--	3,2	3,9
28. Los guiones de prácticas son completos, recogen los objetivos y especifican claramente la tarea que hay que desarrollar.	--	3,1	3,1
29. Las sesiones de prácticas están bien programadas. Su número y duración son correctos en comparación con el global de la asignatura.	--	2,3	2,6
30. Hay buena coordinación entre la teoría y las prácticas.	--	3,1	3,1
31. El laboratorio está bien equipado y dispone de los recursos y materiales necesarios.	--	3,4	3,8
32. El empleo de una plataforma de sensores de salud como e_Health para arduino resulta estimulante y adecuada para las prácticas de instrumentación biomédica.	--	4,4	4,2
33. Los contenidos y objetivos de las prácticas parecen asequibles.	--	2,9	2,9
34. La carga de trabajo es adecuada.	--	2,4	2,5
35. El seguimiento y apoyo del profesor en el laboratorio es suficiente, para cumplir con los objetivos de cada práctica.	--	2,9	2,5

TABLA X. ENCUESTA SEEQ: ACTITUD Y GRADO DE SATISFACCÓN

Cuestiones	Actitud y Grado de Satisfacción		
	13/14	*15/16*	*16/17*
36. He estado muy motivado con la asignatura. He seguido habitualmente las clases y las he llevado al día.	--	3,4	2,7
37. He preparado con antelación el trabajo cada sesión de laboratorio	--	3,4	3,8
38. Considero que la materia que se imparte es de interés para mi formación.	--	4,1	4,2
39. En general estoy muy satisfecho con las prácticas de esta asignatura.	--	3,0	2,7
40. Comparativamente, he dedicado más esfuerzo a esta asignatura que a otras.	--	4,0	3,8
41. El trabajo de prácticas ha resultado más sencillo de lo que esperaba.	--	1,7	2,1

La TABLA X. recoge opiniones sobre la actitud y el grado de satisfacción de los estudiantes con la asignatura en general. Sobresale la opinión de que la materia que se imparte es de interés para su formación (cuestión 38), y refuerzan la opinión de que la carga de trabajo les parece alta y la de que el trabajo de las prácticas ha sido más difícil de lo que esperaban (cuestiones 40 y 41).

TABLA XI. ENCUESTA SEEQ: EVALUACIÓN Y EXÁMENES

Cuestiones	Evaluación y Exámenes		
	13/14	*15/16*	*16/17*
42. Los criterios y el procedimiento de revisión y evaluación de cada práctica ha sido adecuado.	--	3,9	2,6
43. Dada la carga de trabajo, la contribución de la calificación de las prácticas a la calificación global de la asignatura me parece adecuada.	--	3,9	2,5
44. Estoy satisfecho con el trabajo realizado y la calificación obtenida en las prácticas.	--	3,6	3,1
45. He aprobado la asignatura.	--	3,8	2,9

Finalmente, la TABLA V. y la TABLA XI. recogen las opiniones sobre el sistema de evaluación. De nuevo, la opinión más crítica es con las prácticas y su evaluación durante el curso 2016/17 (cuestiones 42 y 43). Cabe notar también que las cifras de la cuestión 45 apuntan a que muchos de los estudiantes que han respondido a la encuesta en este curso manifiestan no haber aprobado la asignatura.

Sorprende, desde el punto de vista del profesor, la valoración negativa en cuestiones que hacen referencia al material empleado, su preparación y exposición (TABLA III. cuestión 5). El trabajo de mejora de materiales utilizados en clase es constatable, tanto en el material auxiliar, como en cuanto a la extensión y mejora de las relaciones de problemas. Quizá sea más entendible la opinión de que el tiempo dedicado a resolver problemas en clase no es suficiente, sin embargo, el alumno debería entender que su papel al respecto tendría que ser más activo.

Destaca también la correlación positiva entre la evolución negativa de la valoración y la de los índices de resultados académicos a lo largo de estos cursos.

C. Discusión

El dato más concluyente sobre la docencia en esta asignatura en sus cuatro años de andadura es el descenso en los índices de resultados académicos que recoge la TABLA II. Lo que apunta hacia un incremento objetivo en la dificultad que encuentran los estudiantes en superarla.

A falta de un análisis más profundo de los datos de resultados, que tenga en cuenta la variabilidad de factores de cada curso, entre ellos, el número y el tipo de alumnos repetidores, y/o el impacto en esas cifras de los cambios introducidos en la ponderación de las distintas componentes de la evaluación global en los diferentes cursos académicos, en este apartado se recogen las impresiones del profesor, respecto a la docencia en general, y a las causas del descenso de los índices en particular.

La dificultad en superar la asignatura, sobre todo en el último curso analizado, puede estar justificada, en una gran parte, por la ya mencionada modificación de la ecuación de evaluación. En todas las pruebas de evaluación escrita, llámense controles o examen final, la resolución de problemas numéricos ha supuesto al menos un 60% de la calificación total de la prueba. Sin embargo, en los sucesivos cursos académicos, aunque la ponderación del examen final en la calificación global de la asignatura siempre ha sido del 60%, en el 40% restante se ha ido incrementando el peso de la calificación de

los controles, en detrimento del de las actividades de exposición oral y de las prácticas de laboratorio. La razón fundamental de esta evolución es la impresión, que muchas veces queda en el profesor al computar la calificación final, de que a algunos estudiantes "los números dan para el aprobado", pero que su habilidad para resolver problemas numéricos de análisis y/o diseño no ha quedado claramente demostrada.

La evaluación de esas otras actividades conlleva siempre un mayor grado de subjetividad, y hay una tendencia a "ser generoso", con lo que las calificaciones en estas componentes suelen ser altas. Por otra parte, el incremento en el número de alumnos ha supuesto una masificación de los laboratorios, con la consiguiente degradación en la atención que el profesor puede dispensar a los estudiantes, y en el rigor en la evaluación de su trabajo. Una de las razones que también invitan a reducir su peso en la calificación final de la asignatura.

Siguiendo los cursos y manuales al uso [11][12][13][14], los problemas numéricos planteados tratan frecuentemente con sistemas dinámicos de primer o segundo orden: circuitos con amplificadores más o menos ideales, y circuitos de acondicionamiento de sensores resistivos, o capacitivos sencillos: divisores de tensión o circuitos en puente. Sobre ellos se pide abordar tareas de análisis y/o de síntesis. Entre las primeras, típicamente la evaluación de prestaciones, en condiciones tanto estáticas: ganancia, errores en la medida, etc., como dinámicas: errores dinámicos, tiempo de respuesta, ancho de banda, etc. Y entre las segundas, la selección de los valores de los componentes de circuitos típicos de amplificación y acondicionamiento, a fin de cumplir con los requerimientos o especificaciones dadas, en términos del mismo tipo de prestaciones, que se les pide obtener en los problemas de análisis: velocidad de respuesta, o máximo error tolerable, (errores de ganancia, linealidad o errores dinámicos).

La práctica docente de estos años ha revelado la especial dificultad que enfrentarse a problemas de este tipo les supone a los estudiantes. En nuestra opinión, la razón de esta dificultad no está tanto en una deficiencia en la formación básica recibida, sino más bien en la falta de tiempo y ejercitación, que permita madurar lo aprendido, y ponerlos en relación con una visión más de ingeniería acorde con las competencias en cuanto a análisis y síntesis de sistemas que se les presentan y exigen en IB.

En cuanto al trabajo práctico, en general, aunque los conocen, encuentran dificultades en el uso de los simuladores de circuitos para resolver problemas, y en el manejo del instrumental de laboratorio; —de nuevo aquí, la falta de ejercitación y maduración de lo aprendido, parece un factor determinante —.

Por otra parte, la incorporación en las prácticas de la asignatura "Ingeniería del Software" (ISW) —3er curso 1er semestre— en los dos últimos cursos, del uso de dispositivos como Arduino, ha facilitado en gran medida el trabajo con la plataforma e-Health, propuesto en IB, y ha aliviado la tarea, y la necesidad, de dedicar tiempo a introducir los fundamentos de programación con Arduino, que se hizo necesaria durante los cursos iniciales. Sin embargo, en general, aunque mantienen una actitud muy positiva ante las prácticas, en la mayoría de los estudiantes se echa en falta tanto conocimientos básicos sólidamente asentados, como iniciativa para ir un poco más allá de las tareas y propuestas de aplicación que sugieren los guiones de prácticas. Además, el adquirir y/o refrescar las habilidades necesarias, le supone un sobresfuerzo, que repercute, sin duda, en la precepción de una elevada carga de trabajo.

Por su parte, es de destacar la buena disposición de los estudiantes a actividades de búsqueda de información, elaboración de informes y posterior exposición de trabajos relativos a novedades en el campo de la instrumentos y dispositivos médicos, ya sea en forma de presentación oral o poster. Si bien, muchas veces, en estos trabajos se echa en falta cierto rigor técnico, y exhiben un sabor más bien comercial, quizá propio de las fuentes de referencia utilizadas: principalmente internet.

Ante este panorama surgen numerosos interrogantes respecto al planteamiento actual de la asignatura, o sobre papel de la materia y su nivel de exigencia en la titulación. Sin ánimo de ser exhaustivo, algunas de esas cuestiones podrían ser:

- ¿Cómo de importante es en la formación de estos estudiantes ejercitarse en la resolución del tipo de ejercicios y problemas que se les plantean actualmente en IB? ¿Se les ha dado a estos un peso excesivo en la calificación final?
- ¿Se debería dar más peso al desarrollo de proyectos basados en e-Health, o a las actividades de búsqueda de información, elaboración de informes y presentación oral, a pesar de las dificultades mencionadas?
- ¿Qué otras actividades que permitan desarrollar los contenidos se deberían proponer y potenciar?
- ¿Está bien planteada la asignatura IB en un contexto profesional más realista?
- ¿Se puede interpretar los descriptores de la memoria del título en otro sentido, para cumplir las capacidades asignadas? ¿Deberían éstas ser más concretas?
- ¿Qué debe esperarse y que nivel ha de exigirse en la formación en electrónica en un título multidisciplinar como este? ¿Se dedican a la materia créditos suficientes para abordar ese nivel de exigencia?
- ¿Se están dando a los estudiantes los medios y las bases adecuadas, para ese nivel de exigencia?

Por otra parte, del seguimiento de egresados que realiza el observatorio de empleo de la universidad [15], y en particular de los egresados de la E.T.S.I Informática [16], donde se imparte el Grado en Ingeniería de la Salud; o bien del contacto a través de redes sociales profesionales, o del contacto personal de algunos estudiantes que han pasado por la asignatura, se puede constatar que la formación recibida en la titulación les permite, sin especial dificultad, abordar nuevos retos, tanto formativos, como profesionales. Muchos de ellos son capaces de continuar su formación en cursos de *master*, tanto en esta universidad, como en otras universidades, tanto españolas como extranjeras, y en especialidades afines, incluidas la electrónica, la robótica, la mecatrónica, etc., e incluso en otras

especialidades que les permiten ampliar su, ya de por sí, multidisciplinar formación. Otros estudiantes consiguen becas para ampliar su formación en países de alto nivel tecnológico como son Corea o Japón, o comienzan a dar sus primeros pasos en el mundo laboral en empresas del sector de la tecnología y la salud. De aquí se desprende que, en definitiva, la influencia de una asignatura en el desarrollo de una carrera profesional no es, a la postre, tan determinante, y que los egresados de esta titulación van encontrando su camino de promoción.

V. Conclusiones

La enseñanza de electrónica en titulaciones de fuerte trasversalidad y contenido interdisciplinar es un reto que obliga, sobre todo en las fases iniciales de su puesta en marcha, a un continuo ejercicio de ajuste y selección tanto de objetivos como de contenidos y método de trabajo. Tras cuatro cursos de andadura de la asignatura Instrumentación Biomédica, en el Grado en Ingeniería de la Salud, la degradación progresiva de la tasa de éxito y especialmente la de rendimiento lleva a realizar una reflexión sobre los contenidos impartidos, métodos y actividades de evaluación y su peso en la calificación final. Esta reflexión debe incluir la percepción que se tiene de la docencia tanto desde el punto de vista del profesor, como de los estudiantes. El seguimiento de los egresados es también un buen elemento para valorar y ubicar la asignatura en su contexto.

En este sentido en el caso de IB, un cambio en la orientación y en la ponderación que reciben las diferentes actividades evaluables en la ecuación que determina la calificación final de la asignatura, yendo hacia la potenciación de las actividades prácticas, especialmente aquellas del tipo que permite realizar plataformas como e-Health, completando las aplicaciones, con actividades de análisis y evaluación de los sensores que proporciona, podría ser una buena apuesta. Al mismo tiempo, también habría que abordar los aspectos que dificultarían esta propuesta, como son la progresiva masificación de la asignatura, y el lograr establecer un sistema de evaluación objetivo y sostenible, que permita evaluar con el rigor necesario los logros alcanzados en este tipo de actividades, de forma que en conjunto no suponga una carga excesiva en la labor de seguimiento y evaluación del profesor.

Referencias

[1] https://www.uma.es/grado-en-ingenieria-de-la-salud Web del título en la UMA. (Último acceso abril 2018).

[2] J. G. Webster, Medical Instrumentation: Applications and Design, 4th Ed., Wiley, 2010.

[3] https://www.cooking-hacks.com/ehealth-sensors-complete-kit-biometric-medical-arduino-raspberry-pi Web del producto. (Último acceso abril 2018).

[4] http://www.libelium.com/ Web del provedor. (Último acceso abril 2018).

[5] https://www.uma.es/media/tinyimages/file/MEMORIA_DEFINITIVA_INGENIERIA_SALUD.pdf Impreso de solicitud de verificación del título. (Último acceso abril 2018).

[6] H.W. Marsh, "SEEQ: A reliable, valid, and useful instrument for collecting students´evaluations of university teaching", British Journal of Educational Psychology, vol 52, pp 77-95, Feb. 1982.

[7] R.S. Khandpur, Biomedical Instrumentation: Technology and Applicatins, McGraw-Hill, 2005.

[8] https://oas.sci.uma.es:8443/ht/2017/ProgramasAsignaturas_Titulacion_5157_AsigUMA_53112.pdf Guía docente de la asignatura Electrónica, curso 2017/18 . (Último acceso abril 2018).

[9] https://www.uma.es/centers/subjects_center/etsi-informatica/5157/ Lista de asignatura del grado Ingeniería de la Salud. . (Último acceso abril 2018).

[10] https://www.uma.es/transparencia/info/99207/tasas-de-rendimiento-y-exito-2014-2015/ Tasas de rendimiento y éxito UMA, curso 2014-2015. (Último acceso abril 2018).

[11] M. Granda Miguel y E. Mediavilla Bolado, Instrumentación Electrónica: Transductores y Acondicionadores de Señal, Editorial Universidad Cantabria, 2015.

[12] R. Pallas Areny, Sensores y Acondicionadores de Señal, 4ªed. Marcombo, 2003.

[13] R. Pallas Areny, R Bragós Bardía y O. Casas Piedrafita, Sensores y Acondicionadores de Señal: Problemas Resueltos, Marcombo, 2008.

[14] M.A. Pérez García, Instrumentación Electrónica: 230 Problemas resueltos, Garceta, 2012.

[15] http://observa-e.uma.es/estudios-propios-observae/argos/argos-curso-2015-2016/ Informe egrsados UMA, curso 2015/16. (Último acceso abril 2018)

[16] http://observa-e.uma.es/wp-content/uploads/dlm_uploads/2018/02/04.-E.T.S.-I.-Inform%C3%A1tica-2015-16.pdf Informe egrsados UMA, de E.T.S.I. Informática, curso 15/16. (Último acceso abril 2018)

Desarrollo de un electrocardiógrafo portátil

1st Antonio García Manso
Dept. Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática
Universidad de Extremadura
Cáceres, España
agmanso@unex.es

2nd Jorge A. Flores Román
Escuela Politécnica
Univerisdad de Extremadura
Cáceres, España
jofloresr@alumnos.unex.es

3rd Carlos J. García Orellana
Dept. Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática
Universidad de Extremadura
Badajoz, España
cjgarcia@unex.es

4th Horacio M. González Velasco
Dept. Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática
Universidad de Extremadura
Cáceres, España
hmgvelas@unex.es

5th Ramón Gallardo Caballero
Dept. Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática
Universidad de Extremadura
Cáceres, España
rgallardo@unex.es

6th Miguel Macías Macías
Dept. Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática
Universidad de Extremadura
Mérida, España
mmacias@unex.es

***Resumen*—Esta comunicación se centra en el desarrollo de un trabajo de grado. Entendiendo que en los trabajos de grado se deben aplicar y desarrollar los conocimientos y capacidades adquiridos por los estudiantes, se presenta aquí la realización de un electrocardiógrafo portátil como una síntesis de las competencias adquiridas. El proyecto se desarrolla en diversas etapas desde la captación de la actividad eléctrica del corazón hasta su representación en una pantalla LCD a color de 240×320 píxeles. Donde se indica el número de pulsaciones por minuto y, dependiendo de éste, si el paciente tiene una actividad cardíaca normal o anormal.**

***Index Terms*—Signals capture, amplification, filtering, A/D conversion, digital signal processing, final degree project.**

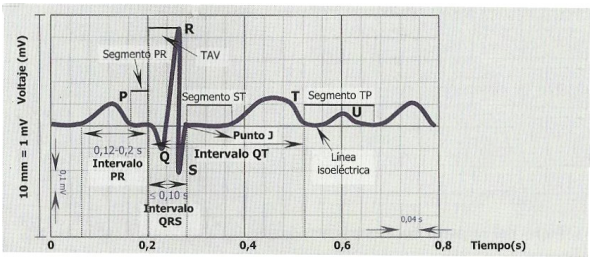


Figura 1. Registro de un ECG donde se distinguen sus características principales.

I. Introducción

El trabajo de grado aquí presentado está relacionado con la instrumentación electrónica y el procesamiento de señales. En titulaciones como el Grado de Ingeniería de Sonido e Imagen en Telecomunicación de la Escuela Politécnica de Cáceres los estudiantes deben cursar 4 asignaturas enmarcadas en el área de Electrónica y otras tantas de áreas afines, teniendo, además, como optativa en el último curso "Diseño Mediante Circuitos Analógicos Integrados". De forma que los bloques básicos de los que se compone el diseño se han tratado anteriormente, tanto en teoría como en prácticas, en las asignaturas cursadas. Si bien es verdad que los bloques básicos que constituyen el electrocardiógrafo (ECG) habían sido estudiados y utilizados, por separado, en las prácticas de las asignaturas cursadas, el proyectando debía enfrentarse a un problema complejo como es medir, mostrar e interpretar la actividad eléctrica del corazón. Para lo cual fue necesaria una labor de documentación previa acerca de como obtener las formas de onda buscadas y, sobre todo, cuales iban a ser los niveles de amplitud de las mismas, Fig. 1. En base a lo cual había que decidir que tipo de dispositivos usar y determinar las conexiones a realizar para la captación de las señales de acuerdo a un esquema definido, donde se considera un punto de referencia sobre el cual efectuar las medidas (Fig. 2). Para ello fue necesario consultar y requerir información de entornos relacionados con la medicina que, en principio, nada tenían que ver con la titulación indicada anteriormente. Esto constituye un gran enriquecimiento para estudiantes en sus últimos años del grado. Es decir, supone una buena oportunidad de colocar al estudiante en un entorno multidisciplinar y de enfrentarlo a problemas reales en un entorno más real y no limitado a su campo específico de conocimiento.

Esto hace que este tipo de trabajo fin de grado sea válido para evaluar un buen número de las competencias que un ingeniero en telecomunicaciones debe haber adquirido al final de sus estudios. Como por ejemplo, dentro de las competencias básicas podemos evaluar que sepan aplicar sus conocimientos a su trabajo o vocación profesional (CB2), que tengan la

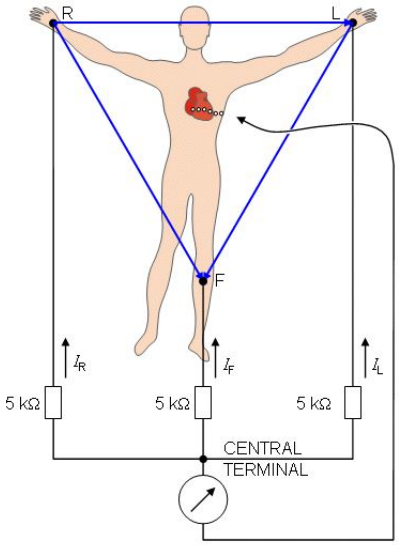


Figura 2. Triángulo de Einthoven. Terminal central de Wilson [1].

capacidad de interpretar y reunir datos relevantes (CB3), que sean capaces de transmitir información, ideas y soluciones a problemas (CB4) y que hayan desarrollado las habilidades de aprendizaje necesarias con un alto grado de autonomía (CB5). Entre las competencias generales podemos evaluar el conocimiento en las materias básicas y las tecnologías que le dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones (CG3), la capacidad de resolver problemas con iniciativa (CG4), la facilidad para el manejo de las especificaciones (CG6) y la capacidad de trabajar en un grupo multidisciplinar (CG9), entre otras. Y, como competencias específicas podemos evaluar los conocimientos básicos sobre el uso y la programación de ordenadores y microcontroladores (CP2), la comprensión y el dominio de los conceptos relacionados con los circuitos eléctricos (CP4), la capacidad de evaluar las ventajas e inconvenientes de las distintas alternativas tecnológicas (CP10) y, por supuesto, la CP26 que, de alguna manera, resume la tabla de competencias, ya que se refiere a como debe realizarse un trabajo fin de grado. Todas estas competencias están recogidas en la documentación referida al Grado en Ingeniería de Sonido e Imagen en Telecomunicación de la Escuela Politécnica de Cáceres [7]

En la siguiente sección se describen los principales componentes utilizados para la captación de la señal del corazón y adecuarla para su posterior visualización. En la sección III se describen el microcontrolador y la pantalla utilizados. Y, en la IV una breve descripción del algoritmo utilizado para obtener el número de pulsaciones por minuto del corazón. En la sección V se describe el proceso seguido para la construcción del electrocardiógrafo y, finalmente, en la sección VI se exponen las conclusiones del trabajo.

II. Descripción de los componentes utilizados.

La magnitud de la señal eléctrica que llega a un ECG está en un rango de 0.5 a 4 mV con un ancho de banda de 0.01-250 Hz [1]. Aunque la media suele ser de 1 mV de amplitud y la señal útil entre 1 Hz y 100 Hz. Una señal de estas características es necesario amplificarla y después filtrarla ya que, el ruido de 50 Hz, proveniente de la red de alimentación, la envuelve completamente. Por lo tanto, se ha dividido la parte del sistema que realiza un procesamiento analógico de la señal, es decir, hasta la inclusión del filtro *antialiasing* y el convertidor analógico-digital en las siguientes etapas.

- **Alimentación**. El sistema de alimentación se realizó con dos pilas recargables de 9 V y dos circuitos conversores DC-DC basados en el integrado LM2596. Antes de esta opción se contemplaron otras, como son el uso de conversores DC-DC que proporcionaran salidas positivas y negativas en un mismo integrado, como por ejemplo el MAX680 o, el TC7660. Pero según sus hojas de características no proporcionaban suficiente corriente para alimentar todas las partes del circuito. También se barajó la opción de utilizar una única fuente de voltaje positivo. Y utilizar dispositivos *"single supply"* , amplificadores operacionales y de instrumentación, y adecuar los circuitos a la alimentación simple y no simétrica. Pero, finalmente, se optó por seguir con la alimentación simétrica ya que el uso de los dos integrados LM2596 daba muy buenos resultados y no era una solución excesivamente costosa.
- **Transductores**. Como transductor se utilizaron electrodos de dos tipos, de pinza para brazos y pierna y tipo ventosa para medidas precordiales (Fig. 3), con los que era posible obtener medidas relacionadas con las corrientes iónicas producidas por la distribución de potencial en el interior del corazón debido a la excitación miocárdica. El corazón, después de todo, es una estructura tridimensional y su corriente eléctrica se distribuye en todas las direcciones a través del cuerpo. Hay que tener en cuenta que las diferentes derivaciones de un ECG se pueden *"considerar"* como diferentes cámaras de vídeo mediante las cuales se puede visualizar la actividad eléctrica del corazón desde diferentes ángulos. De forma que cuantos más puntos, derivaciones, se obtengan mejor será la representación eléctrica del corazón. Los electrocardiógrafos pueden recoger hasta 12 derivaciones. Estas derivaciones se pueden diferenciar dependiendo de si capturan los potenciales directa o indirectamente. Distinguiendo tres derivaciones bipolares estándar (D1, D1 y D3) y tres derivaciones unipolares aumentadas (aVR, aVL y aVF). Además, de otras seis derivaciones de tórax (V1, V2, V3, V4, V5 y V6) que registran las diferencias de voltaje por medio de electrodos colocados en varias posiciones en la pared del tórax [1].
  Los electrodos utilizados llevan una conexión donde acoplar un cable tipo Schiller [8], que es uno de los fabricantes de cables para electrocardiógrafos utilizado



Figura 3. Electrodos utilizados

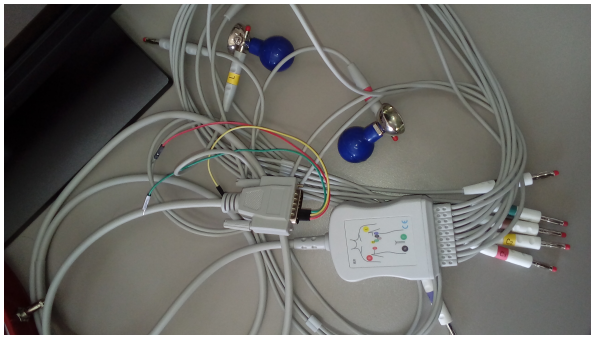


Figura 4. Cable tipo Schiller utilizado para el transporte de señales.

para transmitir las señales (Fig. 4), es decir, es un cable especialmente diseñado para recoger 10 derivaciones de un electrocardiógrafo estándar. Y, decimos cable *"tipo"* Schiller porque no se utilizó un cable original, no teníamos presupuesto para ello y se optó por buscar en otros mercados, principalmente en el mercado chino.

- **Pre-amplificación**. Este trabajo se centró en realizar una medida de las derivaciones bipolares que son las conocidas *derivaciones estándares de Einthoven* D1, D2, D3. Siendo:
  - D1: diferencia de voltaje entre los electrodos del brazo izquierdo (LA) y del brazo derecho (RA) $D1 = LA - RA$
  - D2: diferencia de voltaje entre los electrodos de la pierna izquierda (LL) y el brazo derecho (RA), $D2 = LL - RA$
  - D3: diferencia de voltaje entre los electrodos de la pierna izquierda (LL) y el brazo izquierdo (LA), $D3 = LL - LA$

  As can be seen D2 is the sum of D1 plus D3.
  Esto indica, en todos los casos, que se medirá una señal que será la diferencia de potencial entre dos puntos del cuerpo. Las tres derivaciones estándar tienen inconvenientes y limitaciones, pero también nos permiten hacer algunas medidas básicas como:
  - EL ritmo cardíaco.
  - La posición del corazón.
  - Las medidas de las ondas, espacios y segmentos, sobre todo con D2.
  - El diagnóstico positvo y diferencial de las arritmias.
  - La frecuencia cardíaca.

  También se realizaron algunas pruebas conectando uno de los electrodos directamente al tórax (medidas precordiales) y no en uno de los dos brazos. En la Fig. **??**, se puede ver un esquema simplificado capturado directamente de la hoja de datos del INA114. Se decidió usar el INA114 como amplificador de instrumentación por su elevado valor de rechazo al modo común. Ya que, presenta un CMRR (*Common Mode Rejection Ratio*) como mínimo de 115 dB. Por otro lado, si finalmente se hubiera decido diseñar el circuito con dispositivos *single supply*, el AD623 podría haber sido uno buena opción, ya que permite alimentación simple como modo de operación y es *rail-to-rail*, es decir, puede alcanzar los valores extremos de la alimentación a la salida, aunque su CMRR es un poco menor, según su *datasheet* asegura un mínimo de 90 dB. Por último, una opción interesante, sobre todo si se contempla la adquisición de más medidas (precordiales), una buena opción puede ser el INA2126, ya que dependiendo del encapsulado (S0-16) puede presentar dos amplificadores en un mismo integrado, lo cual puede ser conveniente para salvar espacio a la hora de diseñar el circuito. Aunque presenta un CMRR de 94 dB.

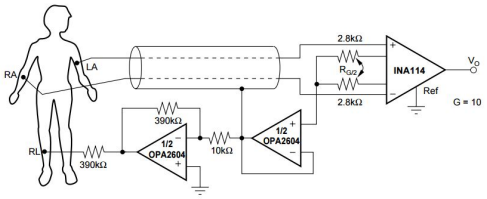


Figura 5. Amplificador de señales para realizar un ECG con accionamiento para la pierna derecha, como se muestra en la hoja de datos de INA114AP

- **Filtrado y amplificación**. El filtrado es, quizás, la etapa más importante debido a que, el ruido de 50 Hz de las líneas de alimentación eléctrica está presente a nuestro alrededor y, de alguna forma se refleja en las mediciones realizadas sobre nuestro cuerpo. Este ruido de 50 Hz que aparece por la producción y distribución de energía eléctrica, irradia un campo electromagnético que es captado por nuestro cuerpo. El campo eléctrico de 50 Hz apenas es capaz de penetrar en nuestro tejido pero para el campo magnético, nuestro cuerpo es permeable a todas las frecuencias [2]. Para eliminar este ruido se utilizó un filtro Notch activo centrado en 50 Hz. Además, aunque en el esquema mostrado en la Fig. 7 no aparezca, se utilizó también un filtro paso alto para eliminar otra componente de ruido de continua presente en la señal. Esta componente de ruido que suele estar por debajo de 1 Hz se debe al contacto entre el electrodo y la piel. Otra etapa importante en cualquier sistema de adquisición de datos es el filtro *antialiasing*. De entre las posibles soluciones para llevar a cabo esta tarea se optó por utilizar un filtro paso bajo de quinto orden basado en el circuito integrado LTC1062. Este filtro

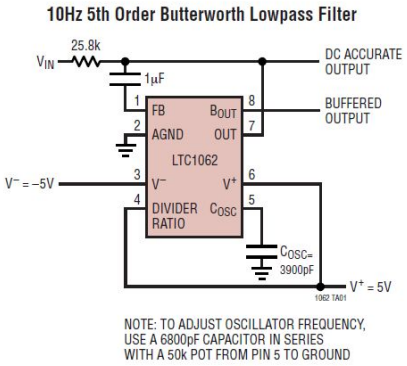


Figura 6. Filtro *antialiasing*

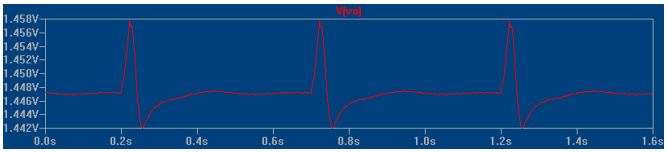


Figura 8. Resultado de la simulación del circuito propuesto. Obtenido mediante una señal sinusoidal de 0.5 mV de amplitud y 50 Hz de frecuencia y uno señal triangular de de valores extremos -1 V y 1 V convenientemente modificada.

se coloca justamente en la última parte del sistema, antes de la entrada al conversor analógico digital del microcontrolador (μc). Esto se hace para evitar que el ruido del cableado que, vaya a la salida de este filtro, pueda afectar a la señal. La frecuencia de corte elegida fue de 120 Hz para más tarde realizar un muestreo a 300 Hz y que no se produzca *aliasing*. El LTC1062 es un filtro de quinto orden que suele ser usado como filtro *antialiasing* con una respuesta bastante plana en la banda de paso. El filtro puede ser controlado externamente con una red RC para ajustar la frecuencia de corte (Fig. 6).

En la Fig. 7 se puede ver un esquema del circuito propuesto hasta la inclusión del filtro *antialiasing* donde se pueden apreciar las distintas etapas que componen el circuito. Y en la Fig. 8 se puede ver un resultado de la simulación obteniendo una onda que recuerda a la que se pretende obtener. En la parte superior de la Fig. 7 y, más esquemáticamente en la Fig. 5, se puede observar el circuito de acople a la pierna izquierda. Este circuito se usa para aumentar la razón de rechazo al modo común. Es decir, analizando este circuito se observa que la función que realiza es poner, de forma dinámica, el cuerpo a un potencial que es el inverso del modo común (amplificado de forma negativa con una ganancia de -39) recogido por los otros dos electrodos. Este circuito dirige una pequeña corriente (menor de 1 μA) a la pierna izquierda del paciente de forma que trata de compensar las corrientes que fluyen por el cuerpo. De esta forma se consigue minimizar el modo común. Por otro lado también mejora la seguridad del paciente creando una tierra virtual y aislando el paciente.

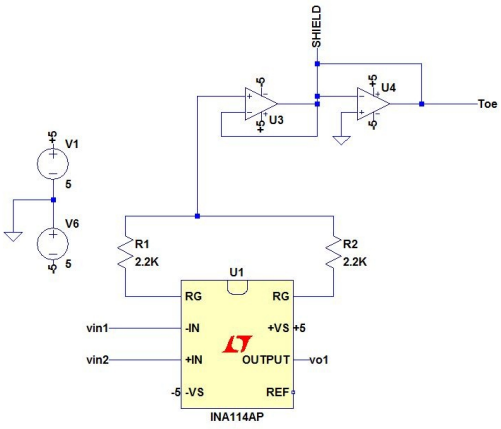


Figura 9. Modificación hecha para el circuito de la pierna.

Sin embargo durante la realización del trabajo, el proyectando observó que el esquema indicado no estaba proporcionando buenos resultados, quizás debido a las limitaciones de los dispositivos empleados, y la señal quedaba envuelta por el ruido de 50 Hz. De forma que optó por el esquema indicado en la Fig. 9. Donde como se puede observar a las entradas del amplificador se conectan los electrodos de captura de las señal, (brazo derecho y brazo izquierdo) y, el circuito de la pierna izquierda se conecta a tierra virtual y a la protección del cable usado (SHIELD).

III. Microcontrolador y pantalla LCD

III-A. Microcontrolador

El uso de microcontroladores cada vez más extendido gracias a la filosofía *"do it yourself"*, (DIY), hace que todo el sistema se pueda integrar de un forma rápida y relativamente sencilla. Esta forma de operar se debe principalmente al acceso en los últimos años a un amplio espectro de herramientas de bajo costo para el prototipado rápido con microcontroladores como Mbed [3], Arduino [4] o Raspberry PI [5]. Arduino y Mbed engloban una gama relativamente amplia de microcontroladores, siendo más numerosa la de Mbed, ya que bajo esta plataforma es posible utilizar microcontroladores de diferentes fabricantes que utilizan procesadores basados en ARM.

Los microcontroladores disponen de conversores analógico digital (ADC), algunos también de digital analógico (DAC), puertos de comunicación (puerto serie, SPI (*Serial Peripheral Interface*), I^2C (*Inter-Integrated Circuit*) ,USB, etc. . .), PWM (modulador de ancho de pulso), entradas y salidas analógicas, entradas y salidas digitales, memorias etc... Con todo lo anterior más una CPU, se pueden realizar una gran variedad de tareas. Algunos μc poseen una CPU bastante potente, como algunos modelos que se pueden operar bajo la plataforma Mbed, con los cuales se puede hacer un procesado digital de una señal (DSP). El microcontrolador usado en este trabajo fue el μc LPC1768 (Fig. 10) que se puede programar *online* utilizando el entorno y el compilador de la plataforma de Mbed. Las características más importantes de

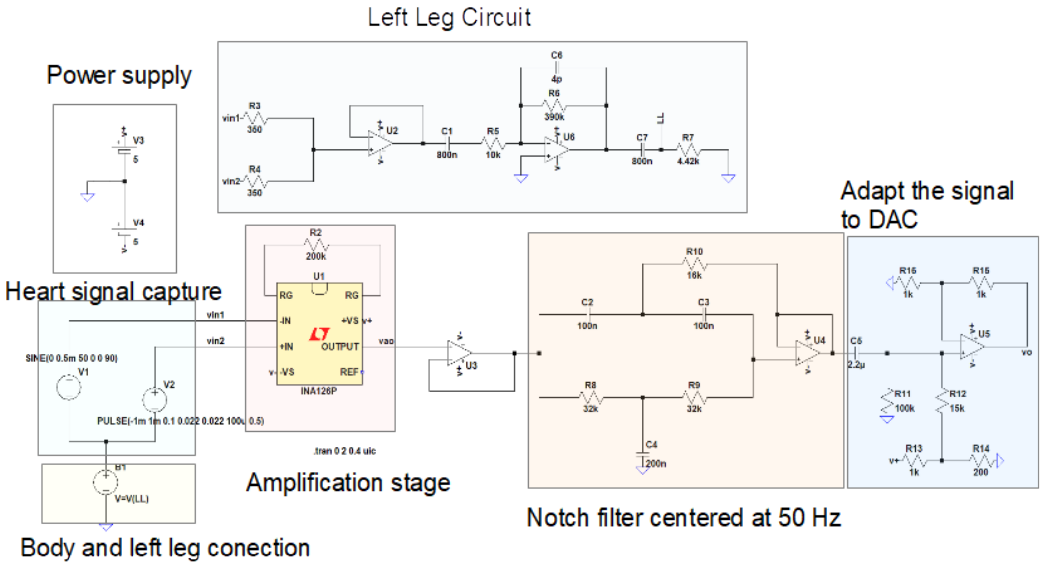


Figura 7. Esquema del circuito propuesto hasta la inclusión del filtro antialiasing.

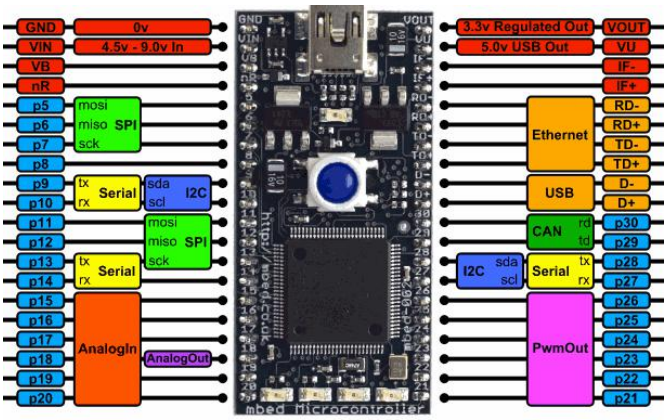


Figura 10. Microcontrolador Mbed LPC1768.

este microcontrolador son:

- Procesador de 32 bits ARM Cortex-M3.
- Frecuencia de reloj de 96 MHz, 512 kB de memoria Flash para programas y 64 kB de RAM.
- Interfaces USB (maestro y esclavo), Ethernet, 2xSPI, 2xI2C, 2xCAN, 6xAnalogIn, 6xPWM, 1xAnalogOut.
- Funcionamiento a 3.3 V, pero las E/S son tolerantes a 5 V.

Admite varias formas de programación, via web indicado anteriormente, [3], mediante un compilador *online* o, Mbed SDK (*"Software Development Kit"*). Mbed SDK se puede programar directamente en C/C++. Aquí se optó por el compilador *online* que se incluye en un entorno amigable en el cual hay que registrar el dispositivo y cargar las librerías adecuadas al mismo. La programación también se realiza en C/C++.

Dado que el microcontrolador permite realizar un procesamiento digital de la señal, se propuso también la realización de un filtrado digital para eliminar el ruido de 50 Hz y comprobar de esta forma que tipo de filtrado, analógico o digital, obtenía mejores resultados. Es decir, el sistema se diseñó de forma que se pudiera optar por el filtrado analógico, filtro Notch o, el filtrado digital. En concreto, para el filtrado digital, se optó por una estructura de filtro FIR (*Finite Impulse Response*). Para la obtención de los coeficientes de dicho filtro se utilizó MatLab con sus funciones específicas para la obtención del filtro. Después de varias pruebas, se encontró un filtro de orden 50 con el que eliminar la componente ruidosa de 50 Hz.

III-B. Pantalla LCD

Se utilizó una pantalla TFT LCD (*Thin Film Transistor-Liquid Crystal Display*) a color de 2.4 pulgadas con una resolución de 240 × 320 píxeles. Esta pantalla utiliza la librería de *drivers* ILI9328. Además, para facilitar su uso se pueden encontrar en los repositorios de Mbed (Code) librerías realizadas por los usuarios. Aquí se utilizó una realizada por Todor Todorov [9]. Decir que se tuvieron que realizar varios ajustes en dicha librería ya que, por ejemplo, parecía que tenía mal definidos algunos colores (verde por magenta) y algunas funciones no hacían lo que se suponía debían hacer (*WakeUp()*). La conexión física entre el microcontralador y la pantalla se realizó con una conexión de 16 bits en paralelo,

para la conexión de datos, además de los pines de tierra y alimentación y otros cuatro de control. Como son Rs selector de registro, Cs *chip selected*, Rd lectura, Wr escritura y el pin de $Reset$.

En una documentación tan extensa como la de la librería ILI9328 que, es de 106 páginas, a veces puede ser difícil encontrar detalles como que había que fijar Rd a 3.3 V para su correcto funcionamiento. Y, si bien es verdad que el *driver* ILI9328 soporta conexión SPI parece que en la pantalla que se utilizó no estaba soportado o, no se encontró la forma de hacerla funcionar. Una vez solucionados los problemas encontrados para la conexión, se usaron las funciones contenidas en la librería facilitada por Todor Todorov para realizar un programa que capturara la señal procedente del corazón y la representara en la pantalla junto con información relativa a la frecuencia cardíaca del paciente.

IV. Detección de la actividad cardíaca

El programa de detección de la actividad cardíaca consistía en un pequeño algoritmo que capturaba intervalos de 6 segundos de la señal para poder medir así la frecuencia. De forma que podríamos considerar que la información mostrada en pantalla no era exactamente en tiempo real (retraso de 6 segundos). Esto se debía, por un lado, al tiempo que necesitaba el algoritmo para realizar los cálculos pertinentes y, por otro lado, a que además debía disponer de datos suficientes para poder dar resultados coherentes. Una vez capturado el intervalo de 6 segundos de la señal, el algoritmo buscaba el máximo y el mínimo de la señal para después detectar los picos. Una vez hecho esto, se podían contar las pulsaciones por minuto del paciente realizando una serie de cálculos sencillos. Y esta información junto con un mensaje indicando si se había detectado bradicardia (ritmo cardíaco lento o irregular), taquicardia (ritmo cardíaco irregular o acelerado) o, pulso normal se mostraba en la pantalla como se puede ver en la Fig. 11. Donde se puede apreciar perfectamente el trazado típico de un pulso del corazón en un ECG. Es decir, en esta imagen se pueden ver correctamente el complejo característico QRS y las curvas características P y T similares a las indicadas en la Fig. 1. Además, se observa que la señal apenas tiene rizado debido al ruido. Decir que esta imagen corresponde a una fotografía tomada de la pantalla cuando el dispositivo estaba trabajando sobre un paciente real.

V. Construcción del Electrocardiógrafo.

La construcción del electrocardiógrafo se orientó a la visualización de la señal del corazón con el menor coste posible. En una primera fase el proyectando trató de hacer el sistema de una forma totalmente autónoma llegando incluso a utilizar monedas de 5 céntimos como electrodos y *Vicks VapoRub* como gel conductor y la tarjeta de sonido de su propio ordenador para captar las señales. Después desde la universidad se le proveyó del material necesario.

Tras todo el proceso de documentación, búsqueda de posibles soluciones y simulaciones necesarias, es decir, una vez el circuito estaba más o menos definido y funcionando

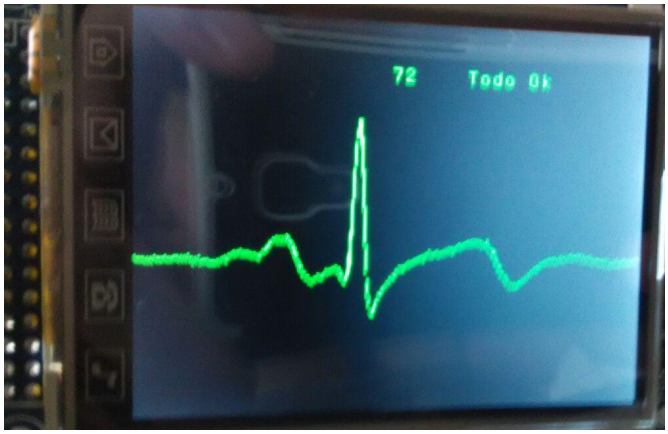


Figura 11. Señal obtenida del paciente y mostrada en pantalla.

sobre *protoboards* se empezaron a diseñar las placas PCB (*Printed Circuit Board*) de 60 mm x 80 mm. Todo ello fue realizado por el proyectando de forma autónoma. Para realizar el circuito en la PCB utilizó fotolitografía con una insoladora casera construida con leds ultravioleta. Para la realización del circuito, enrutado de las pistas y colocación de los componentes, utilizó la versión gratuita de EAGLE [10]. Y para el revelado utilizó una disolución de agua y sosa cáustica. Una vez revelada, utilizó otra nueva disolución de ácido clorhídrico (agua fuerte o, Salfuman), agua oxigenada y agua para atacar la placa y eliminar el cobre sobrante. Mediante FreeCAD [11] diseñó la caja para contener todo el sistema, pero debido a sus dimensiones no se pudo imprimir bien en las impresoras disponibles y se optó por comprar una. El resultado del montaje es el mostrado en las Figuras 12 y 13. Como se puede observar en la Fig 12 el montaje de la



Figura 12. Caja donde se incluyeron todos los circuitos del sistema.

pantalla, conector e interruptor en la caja no fue, estéticamente, del todo satisfactorio principalmente por dos motivos como son, por un lado, la falta de tiempo y, por otro, la falta de herramientas adecuadas con las que poder efectuar de forma correcta los cortes necesarios. Aún así presenta un resultado aceptable para tratarse de un primer prototipo. Y, en la Fig. 13 se puede apreciar el interior de la caja con las distintas partes

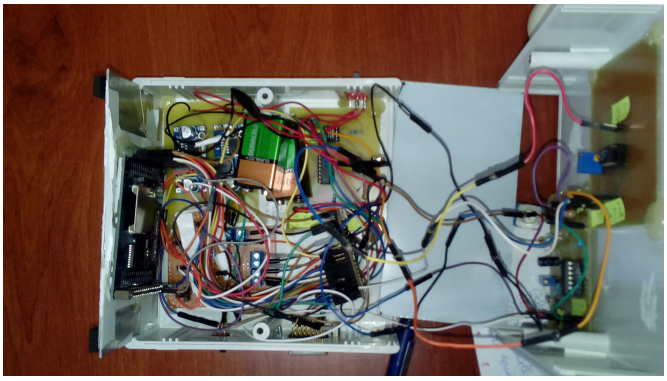


Figura 13. Vista interior de la caja donde se montaron los circuitos del electrocardiógrafo.

del sistema. A modo de resumen se indican las actividades seguidas por el proyectando y el tiempo aproximado que tardó en realizar cada una de ellas para la realización del electrocardiógrafo.

- Estudio básico de la onda cardíaca: 24 horas,
- Diseño de circuito de alimentación: 8 horas,
- Diseño de etapa de pre-amplificación: 15 horas,
- Diseño de amplificación de la señal: 4 horas,
- Diseño de filtros analógicos: 25 horas,
- Diseño de filtros digitales: 20 horas,
- Diseño del sumador de tensión y divisor de tensión: 6 horas,
- Código para mostrar la señal en la pantalla y aprendizaje del uso de la propia pantalla: 50 horas,
- Código usado para la detección de bradicardia o taquicardia: 13 horas,
- Construcción de circuitos en protoboard y pruebas: 100 horas,
- Construcción de prototipo final: 25 horas,
- Pruebas con otros circuitos al final descartados: 20 horas

La suma total de las horas invertidas en la realziación del proyecto fue de aproximadamente 310. Considerando que, según la normativa de trabajo fin de grado recogida en [12] referida al título indicado anteriormente, el estudiante tiene que dedicar un número total de 300 horas a la realización de dicho trabajo y, que como se ha indicado anteriormente son horas aproximadas, el desajuste horario no parece excesivo. Indicando que, corrigiendo algunos factores en los que quizás se tardó demasiado por falta de una correcta planificación del trabajo, se pueden reducir el número de horas a emplear por los proyectandos.

VI. Conclusiones y trabajo futuro

Los resultados obtenidos con la realización de este TFG fueron totalmente satisfactorios tanto para el proyectando como para los demás miembros del grupo. Aunque, quizás, se le podría haber sacado más provecho si desde un principio se hubiera diseñado y estructurado mejor por parte de la dirección del proyecto. Pero, al mismo tiempo, se le hubiera quitado la libertad al proyectando de realizarlo de forma autónoma. Y de buscar sus propias soluciones. De forma que desde la dirección se optó por trabajar a demanda de lo que el proyectando iba requiriendo en cada momento, tratando de que buscara y probara diversas soluciones a cada problema encontrado. Este es un trabajo que admite muchas mejoras futuras así como, potenciar más el procesado digital. De forma que se podrían probar desde estrategias de ahorro de consumo de energía para prolongar la duración de las baterías, hasta hacer un procesado más complejo realizando un electrocardiógrafo completo con los 10 electrodos. De forma que la cantidad de datos registrados sería mucho mayor, por lo que también sería mucho más rica la información que se podría obtener. Dando lugar a diversos enfoques para el trabajo fin de grado o, incluso poder convertirlo en un trabajo fin de máster.

Agradecimientos

El presente trabajo ha sido parcialmente financiado por la Junta de Extremadura y FEDER a través de la ayuda a Grupos de Investigación.

Referencias

[1] A. L. Goldberger, Z. D. Goldberger and Alexei Shvilkin, “Goldberger’s Clinical Electrocardiography: A Simplified Approach”. 9th Edition, Elsevier, ISBN: 978-0-323-08786-5, 2013.

[2] Miguel Ángel Solano Vérez y Juan Sáiz Ipiña. “Apuntes de “Efectos Biológicos del Campo Electromagnético””. Grupo de Electromagnetismo de la Universidad de Cantabria (2010) [En linea]. Disponible en: https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1926/course/section/2221/apuntes_4.pdf.[Accedido: 12/04/2018].

[3] “Development Platform for Devices — mbed”. [En linea]. Disponible en: http://mbed.org/. [Accedido: 16-feb-2018].

[4] “Arduino - HomePage”. [En línea]. Disponible en: http://arduino.cc/. [Accessed: 16-feb-2018].

[5] “Raspberry Pi — An ARM GNU/Linux box for $25. Take a byte!” Disponible en: https://www.raspberrypi.org/ . [Accedido: 16-feb-2018]

[6] “a-Si TFT LCD Single Chip Driver 240RGBx320 Resolution and 262K color. Datasheet”. [En linea]. Disponible en: https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/ILI9328.pdf. [Accedido: 21-feb-2018].

[7] “Competencias en el Grado en Ingeniería de Sonido e Imagen en Telecomunicación”. [En linea]. Disponible en: https://www.unex.es/conoce-la-uex/centros/epcc/titulaciones/info/competencias?id=1628. [Accedido: 09/04/2018]

[8] “Schiller 10-Lead, 2 meter, Resting ECG/EKG Patient Cable with Banana Plugs, USA”. [En linea]. Disponible en: http://www.schillerservice.com/Schiller_10_Lead_2_meter_Resting_ECG_EKG_Patient_p/2.400071s.htm. [Accedido: 10/04/2018]

[9] “Todor’s public repositories”. [En linea]. Disponible en:https://os.mbed.com/users/ttodorov/. [Accedido: 12/04/2018]

[10] “EAGLE”. [En linea]. Disponible en: https://www.autodesk.com/products/eagle/overview. [Accedido: 16/04/2018]

[11] “FreeCAD”. [En linea]. Disponible en: https://www.freecadweb.org/?lang=es_ES. [Accedido: 16/04/2018]

[12] “ Plan Docente de la Asignatura. Trabajo Fin de Grado”. [En linea]. Disponible en: https://www.unex.es/conoce-la-uex/centros/epcc/titulaciones/info/asignaturas?id=1628. [Accedido: 17/04/2018]

ECG study in practical labs for biomedical engineering training

Pablo Pérez García, Alberto Olmo Fernández, Alberto Yúfera García
Electronic Technology Department, Higher School of Computer Engineering
University of Seville
Seville, Spain
pablopg@us.es

***Abstract*—Non-invasive biomedical measurements are one of the most important technological contributions within the biomedical engineering field. On this paper, a dual laboratory session student oriented is designed to simulate and implement a cardiac signal monitor. During the first session, ORCAD PSpice software is used to simulate the whole process. The students can acquire knowledge on the process by configuring and running both the instrumentation amplifier and a passive filter to improve the signal quality. The second session requires from the student basic laboratory skills to use a specific printed circuit board (PCB) to measure its very own cardiac potential. As a result, from this session, the student can visualize the ECG signal acquired directly on the laboratory oscilloscope.**

Keywords—Biomedical; Instrumentation; Amplifiers; Non-invasive measurement; ECG.

I. INTRODUCTION

This work is presented within the Electromedicine course held under the "Health Engineering Degree. Biomedical Engineering mention" in the Higher Technical School of Computer Engineering, University of Seville. The lab sessions for this course aims at introducing the students to the electronic devices being employed on the medical field for healthcare in diagnosis, treatment and research [1].

To accomplish such purpose a project-based learning is proposed during the laboratory sessions. The students face a set of real world electromedicine problems. Of great interest is the analysis of non-invasive biomedical signals like the study case presented in this paper; cardiac potentials. Cardiac potential analysis is a very important medical tool extensively used to detect potential life-threaten conditions on patients worldwide [2]. It is a simple technique consisting on the observation of electrical potentials at the patient skin using appropriate instrumentation. The students achieve a great degree of insight in the measurement of such signal during the laboratory session.

In addition, an important set of skills are empowered during the learning sessions forming this block at this Electromedicine course. The students familiarize themselves with the engineering approach to a real-life problem; step by step. First of all, to develop a certain amount of intuition on the circuit behaviour, they are asked to implement the circuit on a PSpice simulator, for such purpose they are provided with typical sample readings from the skin, and their task is to understand the instrumentation amplifier and obtain the electrocardiogram signal on the simulator which corresponds to that sample input. Secondly, they are asked to implement and test the circuit using a specifically designed printed circuit board (PCB) and a set of electronic components and they will test the instrumentation amplifier to verify its simulated behavior and finally use it along with the PCB to observe their very own electrocardiograms on the oscilloscope.

II. METHODS AND MATERIALS

A. *Circuit for cardiac potential measurement*

The work presented here illustrates a possible setup for the measurement of biopotential, more specifically, cardiac potentials, using discrete electronic modules [3]. The necessary components are an instrumentation amplifier, the electrodes for the body-amplifier interface and the passive components for perform the filtering before acquiring the signal with the oscilloscope. The basic circuit to achieve such purpose is presented on Figure 1.

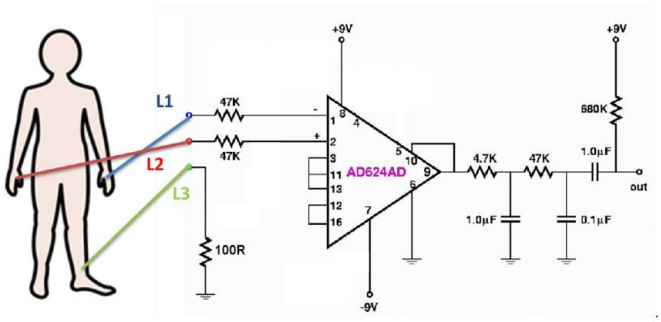


Figure 1: Basic electrocardiography circuit.

B. *Materials*

The student is provided with a printed circuit board which was designed for this laboratory sessions by the Electronic Technology department from University of Seville [4]. This board implements all the necessary components for acquiring the signal and it is shown on the figure 2. The three main connectors correspond to power, signal output and body electrodes, furthermore, the passive components which form

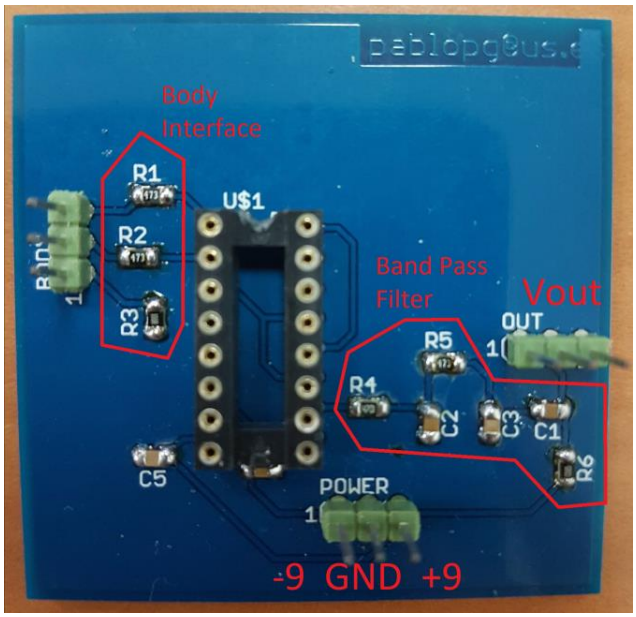


Figure 2: Printed Circuit Board for the test.

the filtering stage are also included setting the system ready for performing the ECG visualization.

The Instrumentation amplifier which fits on the socket in the PCB is the AD624AD. For performing the cardiac potential acquisition task, it is necessary to configure the pinout amplifier to a gain of around 1000. This is performed by connecting pins 13, 11 to pin 3 and pin 12 to 16. The amplifier features are:

- Low noise: 0.2 µVpp.
- High CMRR: 130 dB.
- Low input offset voltage: 25µV.
- Pin programmable gains: 1, 100, 200, 500, 1000.

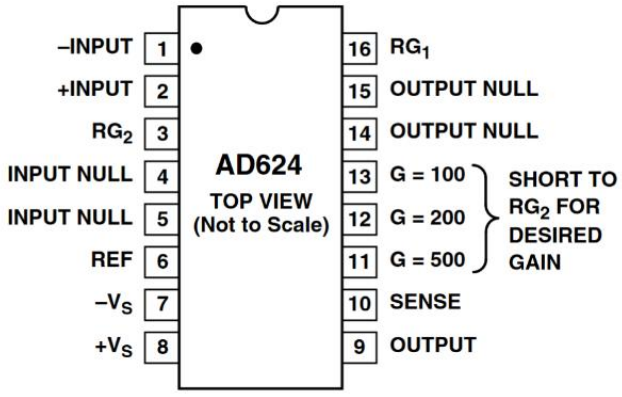


Figure 3: AD624AD Schematic and configuration.

The rest of elements for both sessions are:

- Personal Computer with ORCAD PSpice.
- Skin electrodes [5].
- Prototyping board.
- Passive components (resistors, capacitors).
- Oscilloscope.
- Signal Generator.
- Power Supply Units.

III. Laboratory Sessions

A. *First Session*

During the first laboratory session the students must understand and simulate the whole circuit to acquire the cardiac signal measurements using ORCAD PSpice. The laboratory session was created using this software, since ORCAD implements an easy to use option to define excitation signals from text document data, to serve as input voltages/current, making possible to use the information contained on medical databases to simulate our practical problem.

The session is divided into a set of different tasks; all students must complete a set of tasks to prepare themselves for the real components on the second session.

- Understand the behaviour of an instrumentation amplifier by simulating a simple circuit and measuring the output/input gain.
- Implement a simple band pass filter to acquire the output signal and perform a frequency analysis to verify its compliance with the biosignal under test. Figure 3.
- Use the input signals provided to implement and simulate the whole system.

The result of the simulation is the visualization of the signal presented on the Figure 5. ‘ECG’ signal on the lab computer.

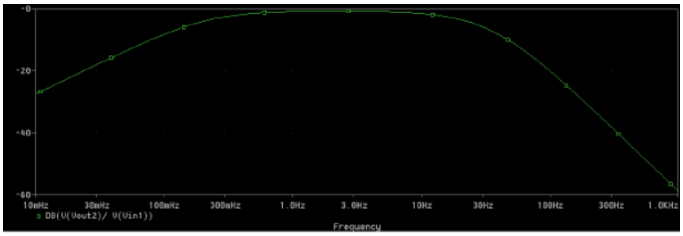


Figure 4: Band Pass Filter Simulation

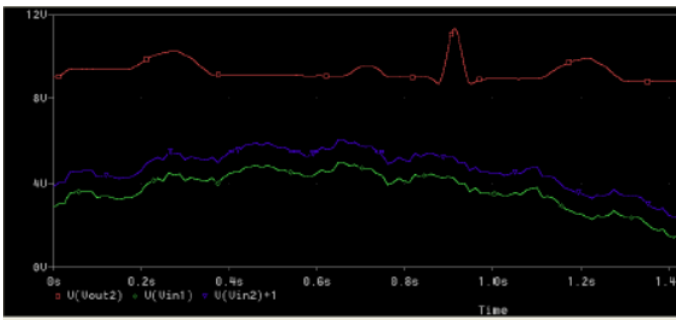


Figure 5: ECG Simulation. Below signals are obtained from input text files and converted to voltage waveforms in PSPICE ORCAD.

B. *Second Session*

On the second session, the work relies on re-implementing the circuits studied on the previous session but using the real components. The first task assigned was to verify the behaviour of the Instrumentation Amplifier in the lab using a signal generator and introducing a small sinusoidal wave (~5mV and below) on the differential inputs on the device and coupling the ground references. By configuring adequately, the device the students can observe the output signal as a 5V sinusoidal wave, hence verifying the gain value predicted on the simulations.

Once the instrumentation amplifier was tested, next step is to evaluate the small passive band pass filter provided on the small PCB. The students will use now the signal generator to analyse the frequency response and verify the results obtained in the previous lab session, illustrated on Figure 3. They will inject a sinusoidal signal with frequency in the interest range [ ], and measure the output/input amplitude ratio. The signal is applied through the socket and measure the response at the output (figure 2).

The final step is the most expected by the students. They finally mount the instrumentation amplifier on the PCB and evaluate the whole system behaviour. They must power the board and put the electrodes themselves. Sensing electrodes for left hand (L1), right hand (L2) and left foot (L3) are set for each student. After powering up the device and connecting the oscilloscope to the circuit output they are all surprised by the live result from this small circuit. The signal presented on the Figure 5, is an example of the ECG output from this final task. This signal represent the student electrocardiogram amplified a factor of 1000.

Finally, the students are requested to retrieve the parameters of the signal observed; frequency of beats (RR segment), maximum amplitude along with their physical characteristics (voltage of R wave); sex and weight, as the report their individual state.



Figure 6: ECG experimentally observed on the oscilloscope by the students.

IV. Results

A. *Student results*

As a final exercise the students were asked to gather some information from the signal displayed on their oscilloscopes, their own ECG. The signal quality was somehow affected by the electrodes connection, and noise level varied intensely among the different students. However, all of them reach the visualization like the depicted on the figure 5.

Data gathered by the students on the lab is presented on the table 1. The final row on the table is the mean value represented with the standard deviation computed from the experimental data acquired by the students in the laboratory sessions. The final row represents the main value obtained and the standard deviation observed, there are three values considered as outliers since those are clearly out of the main tendency and is probably due to a misread on the oscilloscope scale by a group of students.

Table 1: Results measured by the students.

Frequency (bpm)	Amplitude (mV)
60	2.12*
100	2.16*
80	3.28*
80	0.55
92	0.46
75	0.64
80	0.62
79	0.57
100	0.78
90	0.8
89	0.396
60	0.456
76	0.480
73	0.225
67	0.54
75	0.7
94	0.84
92	0.77
75	0.64
80	0.6
67	0.51
77	0.55
112	0.51
68	0.2
80	0.7
83	0.82
80	0.9
64	0.4
96	0.45
80	0.6
80	0.3
80	0.6
80±12	0.76±0.62

* Values considered as outliers.

The following graph on Figure 7 depicts the resulting frequency vs amplitude values on a scatter plot style. The tendency confirms that greater bpm involves greater amplitude on the electrical impulse, however the variance is big (same order as the magnitude we are measuring) in the amplitude.

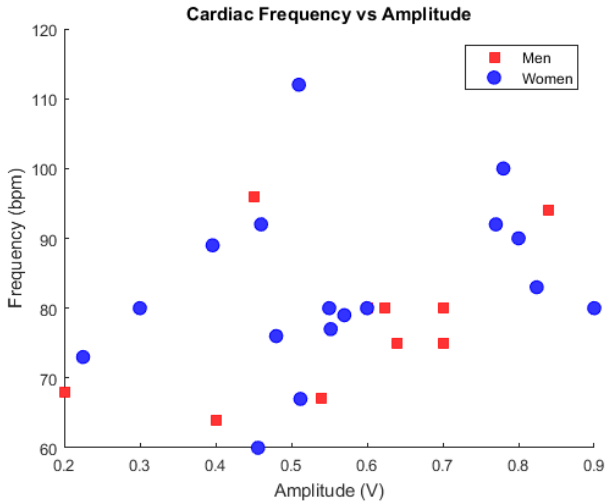


Figure 7: Signal Parameters acquired by the students in the lab.

B. Session outcomes

From an engineering point of view, it is very important to remark the specific training for the future designers of biomedical instrumentation and devices, in the correct process to create. This session allows simulating, implementing and testing the proposed ECG circuit approach, showing them the importance of achieving a certain intuition into the system under development before actually facing the real circuit.

Additionally, the high level of motivation introduced into most of the students attending the session was a great outcome. They gained an important insight into one of the most employed biomedical non-invasive marker and its acquisition. The electrocardiogram technology illustrated during these sessions has several applications besides monitoring, for instance, smart pacemakers rely on cardiac potential measurements for deciding when the injected pulse will trigger a beat on a patient's heart, thus contributing to power performance and health safety allowing the patients to receive only cardiac stimulation when needed.

For the teachers in the course the most remarkable outcome is the satisfaction and motivation observed on the students which attended the laboratory session. It was considered a great experience and we would like to share the printed circuit board design, it is available on [4].

V. Conclusions and Future Work

Besides the strong training achievement and the motivation generated in the students, this work provides a methodology to explore new laboratory session creation, following the same schema.

The course takes part in the fourth year in the Health Engineering degree and it is part of the Biomedical Engineering mention.

During this session the students were able to witness a real medical signal acquisition. They are familiar with courses ranging from physiology and anatomy, to electronics and biomedical instrumentation. This double session improves specific skills on biomedical engineering design using the accumulated knowledge from the syllabus of several courses in the degree. Furthermore, the students are trained using an engineering approach to problem, covering several stages; problem definition, solution simulation to gain a certain degree of intuition on the process and solution testing using real electronic components.

A future lab session for the students within the course is under development and could include the simulation and design of a photoplethysmography sensor for pulse and oxygen blood saturation determination, another very useful widespread non-invasive biomedical measurement.

Acknowledgment (Heading 5)

The authors would like to thank the students in the Electromedicine laboratory for their dedication and kind response to the laboratory sessions.

We would also like to thank the department technical support team for helping with the implementation and test of the prototypes.

References

[1] J. G. Webster and J. W. (John W. Clark, *Medical instrumentation : application and design*. John Wiley & Sons, 2010.

[2] "Electrocardiogram: MedlinePlus Medical Encyclopedia." [Online]. Available: https://medlineplus.gov/ency/article/003868.htm. [Accessed: 17-Feb-2018].

[3] "Electrocardiogram (ECG) circuit diagram for use with oscilloscopes." [Online]. Available: https://www.picotech.com/library/application-note/electrocardiogram-ecg-circuit-for-use-with-oscilloscopes. [Accessed: 09-Feb-2018].

[4] "pablopgus/ElectrocardiogramBoard: A printed circuit board for visualizing electrocardiogram on the oscilloscope using laboratory equipment and an AD624AD instrumentation amplifier." [Online]. Available: https://github.com/pablopgus/ElectrocardiogramBoard. [Accessed: 20-Feb-2018].

[5] "Electrodo Desechable Foam GS43 (Bolsa 50u) - Ribas Medicina." [Online]. Available: https://www.ribasmedicina.com/producto/electrodo-desechable-foam-gs43-bolsa-50u/. [Accessed: 20-Feb-2018].

Evaluación de Incertidumbres de Medida en las Curvas de Calibración de los Sensores de Medida

Camilo Quintáns Graña, Ramiro Iglesias Suarez-Pumariega, Jorge Marcos Acevedo
Departamento de Tecnología Electrónica
Universidad de Vigo
Vigo, España
quintans@uvigo.es, acevedo@uvigo.es

Resumen— En la enseñanza práctica de los sensores es importante disponer de un método que permita a los alumnos obtener la curva de calibración de los sensores de forma eficaz. Típicamente se utiliza el método de regresión lineal por mínimos cuadrados para deducir dicha curva de calibración a partir de un conjunto de medidas. Sin embargo, cuando se desea obtener, además, la incertidumbre de medida asociada, el procedimiento es más complejo y se deben considerar distintas opciones según cómo se hayan tomado las medidas, se hayan repetido los experimentos, etc. En este trabajo se presenta la metodología seguida para obtener la curva de calibración con la incertidumbre asociada en el caso en el que se utiliza la regresión lineal por mínimos cuadrados, tanto si se minimiza la varianza de las muestras como si se utiliza el método de máxima verosimilitud.

Lista de términos—Curva de calibración, incertidumbre de medida, regresión lineal, sensor.

I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo se enmarca dentro de la asignatura ACS (Acondicionadores de Señal) del Master Universitario en Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad de Vigo [1]. La asignatura tiene un peso de 5 ECTS, distribuidos por igual entre práctica y teoría, y se imparte en segundo curso. En general, el perfil de los alumnos que acceden al máster son los graduados del Grado de Tecnologías de Telecomunicación, y en su currículo solo se ha hecho una pequeña introducción al cálculo de incertidumbres de medida en la asignatura de Física de primer curso. El objetivo principal en el máster es el de ampliar los conocimientos del cálculo de incertidumbres para aplicarlos a los sistemas electrónicos de medida.

En ACS se hace una introducción a los sistemas de medida de variables físicas y, a continuación, se estudia el tema de metrología, que incluye la evaluación de la incertidumbre de medida [2]. Después se estudian distintos tipos de acondicionamientos, tanto para sensores de medida como detectores todo-nada. Finalmente, se estudian los acondicionamientos para sensores magnéticos, capacitivos, inductivos y electromagnéticos. Se hace hincapié en los acondicionadores de alterna de señales temporales que llevan la información en la fase, la frecuencia y la amplitud. En la parte práctica, se realizan dos sistemas de medida completos.

El cálculo de incertidumbres es un tema transversal a toda la asignatura y se le da importancia en todas las etapas del diseño de los circuitos acondicionadores. La principal referencia seguida es el método GUM [3], [4], que se amplía con la parte estadística, sobre todo para la obtención de las curvas de calibración [5], [6]. Los principales bloques dentro del tema de cálculo de incertidumbres son:

1) Introducción: Definiciones y términos utilizados. Descripción del método GUM.

2) Ley de propagación de incertidumbres: Notas prácticas y ejemplos de cálculo.

3) Obtención de las curvas de calibración de los sensores y del sistema de medida.

Este tercer bloque es el más importante. Se trata de tener en cuenta la incertidumbre de los pares de medidas realizadas. Cada par de medidas (x,y) se obtiene con el medidor de referencia y con el medidor de salida del sensor. Por tanto, se parte de que existen unas incertidumbres u_x y u_y, que se pueden considerar iguales para todas las medidas o no. Además, se consideran distintos casos a la hora de repetir los experimentos, ya que no hay una única forma de tratar las distintas series de medidas (se pueden repetir las medidas x o no, dependiendo del tipo de experimento). Por ello, a la hora de aplicar el método de mínimos cuadrados para realizar la regresión lineal puede ser útil minimizar la varianza de las muestras o utilizar el método de máxima verosimilitud incluyendo la incertidumbre en el propio proceso de obtención de la curva de ajuste [6], [7].

En el primer caso, la incertidumbre se considera constante en todo el rango, mientras que en el segundo es una curva de un grado mayor que el de la curva de calibración. Se deduce que el objetivo final es disponer, no solo de una ecuación correspondiente a la curva de calibración, sino también de otra para la incertidumbre. De esta forma cuando se utiliza la curva de calibración para proporcionar un resultado de medida se dispone de la incertidumbre asociada dependiendo del punto del rango de medida de que se trate.

II. DESCRIPCIÓN DE LA ASIGNATURA ACS

En ACS se estudian los circuitos electrónicos que acondicionan las señales generadas por los sensores de medida para poder acoplarlos de forma adecuada a los sistemas de adquisición de datos o a un procesador digital.

Es continuación de la asignatura Diseño de Circuitos Electrónicos Analógicos, que se imparte en el primer curso del máster. Se amplían los circuitos básicos de acondicionamiento incluyendo los puentes de medida activos, lo circuitos de acondicionamiento en alterna, convertidores frecuencia-tensión, etc. Se aprende a caracterizar la medida que

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

proporciona un sensor mediante su curva de calibración y su incertidumbre de medida.

La teoría se complementa con las prácticas de laboratorio que se centran en proporcionar al alumnado los conocimientos prácticos necesarios para abordar la realización de un sistema de medida completo, desde el sistema físico hasta la interfaz de usuario. Los puntos clave del trabajo de laboratorio son:

- La metodología a seguir para la medición de variables físicas y el cálculo de incertidumbres.
- La caracterización de transductores.
- Las topologías de los circuitos de acondicionamiento.
- El acoplamiento de las señales acondicionadas a un procesador digital.
- El software de instrumentación para el acondicionamiento digital y las interfaces de usuario.

A. *Competencias específicas y resultados de aprendizaje*

La asignatura tiene, además de algunas competencias generales del master, la siguiente competencia específica: Capacidad para construir un sistema de medida de una variable física desde el transductor hasta la interfaz de usuario, incluyendo conocimientos de metodología, de topologías básicas de acondicionamiento de señal y de software de instrumentación.

Los principales resultados de aprendizaje son:

- Saber modelar y simular un sistema electrónico analógico mediante el lenguaje de descripción hardware PSpice.
- Saber evaluar las incertidumbres en los procesos de medida de acuerdo a la normativa.
- Diseñar circuitos electrónicos complejos para acondicionamiento de sensores.
- Analizar y diseñar circuitos de interfaz entre los sensores y los procesadores digitales.
- Desarrollar sistemas electrónicos de instrumentación.

B. *Contenidos de ACS*

1) Introducción a los sistemas de medida de variables físicas. Características de funcionamiento y operativas de los sensores. Evaluación de datos de medición. Calibración de sensores. Incertidumbres de medida. Partes de un circuito de acondicionamiento. Tipos de acondicionamientos.

2) Introducción a la metrología. Evaluación de la incertidumbre de medida. Metodología para realizar medidas y calibraciones con sensores. Terminología. Método estadístico.

3) Circuitos para adaptación de señales de sensores de medida. Puentes activos de medida en alterna y continua. Convertidores alterna/continua. Elección y diseño de las etapas de filtrado. Convertidores frecuencia/tensión. Adaptadores para el rango de salida.

4) Interfaces entre sensores todo-nada y procesadores digitales. Conceptos básicos de interfaces locales de sensores toto-nada. Interfaces con y sin aislamiento galvánico. Acoplamiento en alterna y en continua.

5) Circuitos para acondicionadores de sensores de medida inductivos y magnéticos. Estudio de los acondicionadores para distintos tipos de sensores inductivos y magnéticos según su aplicación.

6) Circuitos para acondicionadores de sensores de medida capacitivos. Estudio de los acondicionadores para distintos tipos de sensores capacitivos.

7) Circuitos para acondicionadores de sensores de medida generadores. Estudio de los acondicionadores para distintos tipos de sensores generadores según su principio físico de funcioanamiento.

8) Casos prácticos de circuitos acondicionadores de sensores de medida. Estudio de casos reales con sensores y circuitos comerciales.

III. Introducción al Cálculo de Incertidumbre en ACS

Los distintos apartados del tema son:

1) Introducción: Se definen los conceptos y términos comunes en metrología y se relacionan las normas y organismos internacionales.

2) Magnitudes: Se definen los términos magnitudes, valor verdadero y valor convencionalmente verdadero.

3) Incertidumbre: Se define el término incertidumbre en general y en particular el de incertidumbre de medida. Se distingue entre incertidumbre típica, tipos A y B, y combinada.

4) El método GUM: Se describen los pasos para aplicar el método, desde la identificación de las fuentes de incertidumbre hasta la expresión del resultado de la medida. Se completa el tema con un ejemplo de aplicación.

5) Precisión y exactitud: Se definen los términos y se plantean ejemplos demostrativos.

6) Ley de propagación de incertidumbre: Se define la ley y se presentan los casos en los que no hay correlación entre las distintas variables del sistema y en los que la correlación es total. Es importante su aplicación cuando se evalúa la incertidumbre total en un circuito completo de acondicionamiento. Esta parte se amplia cuando se estudian los circuitos de acondicionamiento.

7) Notas sobre el cálculo de la incertidumbre: se resumen consideraciones prácticas para facilitar los cálculos.

8) La Incertidumbre en los Sistemas de Adquisición de Datos: Se presenta un ejemplo práctico de aplicación.

9) Obtención de la curva de calibración a partir de una serie de medidas: Esta es la parte más importante del tema, se presenta cómo se tienen en cuenta las incertidumbre de medida.

IV. Metodología seguida para la Obtención de la Curva de Calibración

Se trata de obtener una estimación de la respuesta del sistema de medida por la recta (1):

$$\hat{y}(x) = \hat{a} + \hat{b} \cdot x \quad (1)$$

En general, si no se dispone de más información, se puede asumir que las incertidumbres de los instrumentos de medida con los que se obtienen los pares de medidas (x_i,y_i) siguen una distribución uniforme. Es decir, es razonable tomar como incertidumbre típica de los instrumentos la mitad de su resolución dividida por $\sqrt{3}$. Por ejemplo, si se está midiendo una distancia con una regla de 1 mm de paso, la incertidumbre típica sería de 0.16 mm.

Básicamente se plantean dos opciones dependiendo del método utilizado. En el primero se obtiene la curva de calibración y la incertidumbre por separado. Mientras que en el segundo se realiza el cálculo para obtener los parámetros de la curva de calibración incluyendo las incertidumbres de medida.

A. Cálculo por separado de la recta de tendencia y de la incertidumbre de medida total

En este método se obtiene la recta de tendencia a partir de los *n* pares de medidas (x_i,y_i) y se calculan por separado las incertidumbres del ajuste y de las medidas, de las cuales se obtiene la incertidumbre combinada, que se expande para disponer, finalmente, de la incertidumbre total. A continuación se describe el procedimiento seguido.

Una vez obtenida la recta de ajuste por el método de mínimos cuadrados. Se obtiene de forma aproximada la incertidumbre bajo los siguientes supuestos:

- Se toma como incertidumbre típica del ajuste al estimador (2). Donde el factor *(n-2)* son los grados de libertad (2 es el número de variables).

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{n-2} \cdot \sum_{i=1}^{N} \left(y_i - \hat{y}_i\right)^2} \quad (2)$$

- Las incertidumbres típicas σ_x y σ_y de los instrumentos se suponen constantes en todas las medidas realizadas.

Según cómo se hayan tomado las medidas en uno o varios experimentos se valoran las siguientes opciones o casos:

1) Caso en el que se ha realizado un solo experimento: Se combinan las tres incertidumbres y se expanden con un factor de covertura *k* (3).

$$U = k \cdot \sqrt{\left(\hat{a} \cdot \sigma_x\right)^2 + \left(\sigma_y\right)^2 + \left(\sigma_r\right)^2} \quad (3)$$

2) Caso en el que se ha repetido el experimento: Si se repite *p* veces el experimento, entonces se tienen *n·p* pares de medidas y se pueden dar las siguientes alternativas:

a) Se pueden repetir los valores $x_{i,1}$=$x_{i,2}$=…=$x_{i,p}$ en cada experimento.

En este caso, para cada x_i, se promedian los valores $y_{i,1}$, $y_{i,2}$,…$y_{i,p}$ y se obtienen *n* nuevos pares de puntos $\left(x_i, \bar{y}_i\right)$, que se tratan como en el caso 1. En este caso, también se podría considerar la desviación de la media $\sigma_y / \sqrt{p}$. Esto supondría que la resolución de la medida se mejora al repetirla.

b) Si no se repiten las p-x_i medidas, pero son muy próximas: Esto implica que la distancia entre dos medidas $x_{i,j}$ y $x_{i,j+1}$ de distintos experimentos *j* y *j+1* están mucho más cerca entre sí que de la siguiente medida $x_{i+1,j}$ del mismo experimento, es decir, se supone que:

$$\left|x_{i,j} - x_{i+1,j}\right| >> \left|x_{i,j} - x_{i,j+1}\right|, \ \forall \ 1 < i < n, \ 1 < j < p \quad (4)$$

Con este supuesto se pueden promediar también los valores de la variable x de los distintos experimentos, y, así, obtener los *n* puntos: $\left(\bar{x}_i, \bar{y}_i\right)$. En este caso también se podría considerar las desviaciones de las medias: $\left(\sigma_y / \sqrt{p}, \sigma_x / \sqrt{p}\right)$.

c) Si no se cumple la condición 2.b, resumida en (4), se construye una nueva tabla de n·p puntos

($x_{1,1}$, $y_{1,1}$), ($x_{1,2}$, $y_{1,2}$),…,($x_{1,p}$, $y_{1,p}$), ($x_{2,1}$, $y_{2,1}$),…($x_{n,p}$, $y_{n,p}$)

y se procede como en el caso 1.

B. Cálculo simultáneo de la recta de tendencia y de la incertidumbre total

En este apartado se supone que ya se estudiaron los supuestos anteriores y que se dispone del conjunto de pares de medidas finales.

Con este método se tienen en cuenta las incertidumbres de medida en el propio proceso de obtención de la curva de ajuste. Es el caso general en el que se hace una regresión lineal con incertidumbre en los datos.

Se parte de *n* pares de datos (x_i, y_i), para los que se puede considerar una incertidumbre típica σ_i distinta para cada y_i, o una igual para todos. Esta suposición es considera correcta si todos los datos se toman con el mismo instrumento en el mismo experimento.

Si se supone que la variabilidad es solo debida a los instrumentos y es igual para todos los puntos, se puede estimar por la ecuación:

$$\sigma^2 \cong s^2 = \frac{1}{n-m} \cdot \sum_{1}^{n} \left(y_i - \hat{y}_i\right)^2 \quad (5)$$

Dado que la aproximación es una recta, *m= 2*, es decir, hay *(n-m) = n-2* grados de libertad:

Se puede suponer que $\sigma_x \cdot \hat{b} << \sigma_y$, y, por tanto, despreciarla ($\hat{b}$ es el coeficiente de sensibilidad dado por $d\hat{y}/dx$). En caso contrario se deben combinar:

$$\sigma^2_{y_combinada} = \sigma_y^2 + \left(\sigma_x \cdot \hat{b}\right)^2 \quad (6)$$

Se trata de buscar los coeficientes $\hat{a}$ y $\hat{b}$ que minimicen el estimador χ^2:

$$\chi^2 = \sum_1^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{\sigma_i} \right)^2 = \sum_1^n \left[\frac{1}{\sigma_i} \left(y_i - \hat{a} - \hat{b} \cdot x_i \right) \right]^2 \qquad (7)$$

Con (8) se obtiene el sistema de ecuaciones (9), del que se pueden despejar los estimadores de los coeficientes de la recta de ajuste (10).

$$\left(\frac{\partial \chi^2}{\partial a}, \frac{\partial \chi^2}{\partial b} \right) = (0,0) \qquad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \sum_1^n \frac{y_i}{\sigma_i^2} \\ \sum_1^n \frac{x_i \cdot y_i}{\sigma_i^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_1^n \frac{1}{\sigma_i^2} & \sum_1^n \frac{x_i}{\sigma_i^2} \\ \sum_1^n \frac{x_i}{\sigma_i^2} & \sum_1^n \frac{x_i^2}{\sigma_i^2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{bmatrix} \qquad (9)$$

$$[a] = \begin{bmatrix} \hat{a} & \hat{b} \end{bmatrix} = [\beta] \cdot [\alpha]^{-1} = \begin{bmatrix} \beta_1 & \beta_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix}^{-1} =$$

$$= \begin{bmatrix} \sum_1^n \frac{y_i}{\sigma_i^2} & \sum_1^n \frac{x_i \cdot y_i}{\sigma_i^2} \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\Delta} \cdot \begin{bmatrix} \sum_1^n \frac{x_i^2}{\sigma_i^2} & -\sum_1^n \frac{x_i}{\sigma_i^2} \\ -\sum_1^n \frac{x_i}{\sigma_i^2} & \sum_1^n \frac{1}{\sigma_i^2} \end{bmatrix} \qquad (10)$$

A la matriz $[\alpha]^{-1}$ se le denomina matriz de errores $[\in]$:

$$\begin{bmatrix} \in_{11} & \in_{12} \\ \in_{21} & \in_{22} \end{bmatrix} = [\alpha]^{-1} = \frac{1}{\Delta} \cdot \begin{bmatrix} \sum_1^n \frac{x_i^2}{\sigma_i^2} & -\sum_1^n \frac{x_i}{\sigma_i^2} \\ -\sum_1^n \frac{x_i}{\sigma_i^2} & \sum_1^n \frac{1}{\sigma_i^2} \end{bmatrix} \qquad (11)$$

Finalmente, a partir de la matriz de errores se obtiene la ecuación de la incertidumbre (12). Para obtener el valor final, solo resta hallar la raíz cuadrada de (12) en el punto concreto x_i y multiplicar el resultado por el factor de cobertura *k*.

$$\begin{aligned} u^2(x) &= u_0 + u_1 \cdot x + u_2 \cdot x^2 \\ u_0 &= \in_{11} = \sigma_a^2 = \frac{1}{\Delta} \cdot \sum_1^n \frac{x_i^2}{\sigma_i^2} \\ u_1 &= \in_{12} + \in_{21} \\ u_2 &= \in_{22} = \sigma_b^2 = \frac{1}{\Delta} \cdot \sum_1^n \frac{1}{\sigma_i^2} \end{aligned} \qquad (12)$$

Si se desea tener en cuenta la incertidumbre σ_x, primero sería necesario obtener unos valores aproximados de los coeficientes $\hat{a}$ y $\hat{b}$ utilizando otro método, es decir, sin tener en cuenta las σ_i.

En el caso en el que las medidas (x_i, y_i) se repiten en *p* experimentos y se obtienen *n* pares $(\bar{x}_i, \bar{y}_i)$ se debe tener en cuenta, además de las incertidumbre de tipo B, las de tipo A: u_{Ax} y u_{Ay}. Esto implica que se combinen las incertidumbres de la siguiente manera:

$$\sigma_i^2 = u_{Ay}^2 + u_{By}^2 + \left(u_{Bx} \cdot \frac{dy}{dx} \right)^2 + \left(u_{Ax} \cdot \frac{dy}{dx} \right)^2 \qquad (13)$$

C. Ejemplo de cálculo demostrativo

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo en el que se han simulado los valores de la Tabla I de forma que se hagan visibles gráficamente las incertidumbres.

Para los cálculos se suponen unas incertidumbres instrumentales para las medidas de las variables *x* e *y* de: u_{Bx}= 0.25 y u_{By}= 0.5.

De los supuestos establecidos según se tomen los pares de medidas en los distintos experimentos, el caso concreto que se maneja es el *2b*, ya que se han promediado las medidas de *p* experimentos, por lo que se cuenta con las incertidumbres típicas u_{Ax} y u_{Ax}.

TABLA I. DATOS SIMULADOS PARA EL EJEMPLO DE CÁLCULO.

n	$\bar{x}_i$	$\bar{y}_i$	u_{Ax}	u_{Ay}
1	1.205	3.178	0.218	0.042
2	2.085	4.992	0.244	-0.124
3	2.890	6.401	-0.223	0.380
4	4.111	9.087	0.234	0.139
5	5.022	10.64	-0.131	-0.183
6	6.031	13.41	-0.110	0.121
7	6.784	14.75	0.034	-0.424
8	7.836	16.75	0.038	-0.191
9	8.843	19.33	-0.021	0.182
10	9.829	21.45	0.113	-0.390
11	10.99	23.82	0.163	0.237

En la Fig. 1 se muestra el resultado para la incertidumbre U_1, que se ha obtenido aplicando el método de cálculo por separado de la recta de tendencia y de la incertidumbre de medida total. Se observa que la incertidumbre obtenida es constante en todo el rango de medida.

En la Fig. 2 se muestra el resultado para la incertidumbre U_2, que se ha obtenido aplicando el método de cálculo simultáneo de la recta de tendencia y de la incertidumbre total. En este caso se observa que la incertidumbre obtenida depende del punto concreto de que se trate dentro del rango de medida. Además, se comprueba que la curva obtenida es un grado mayor que la de la de ajuste.

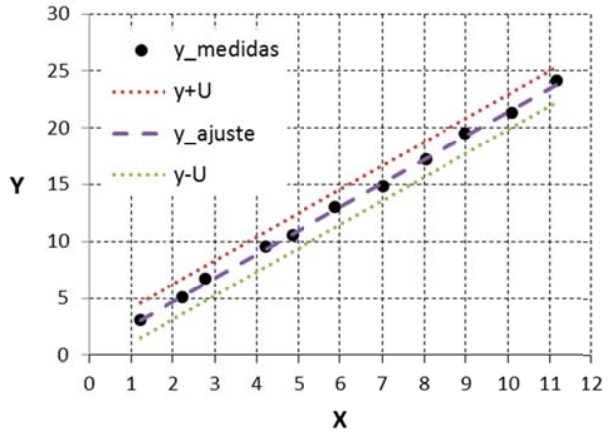


Fig. 1. Recta de ajuste e incertidumbre asociada obtenidas por separado.

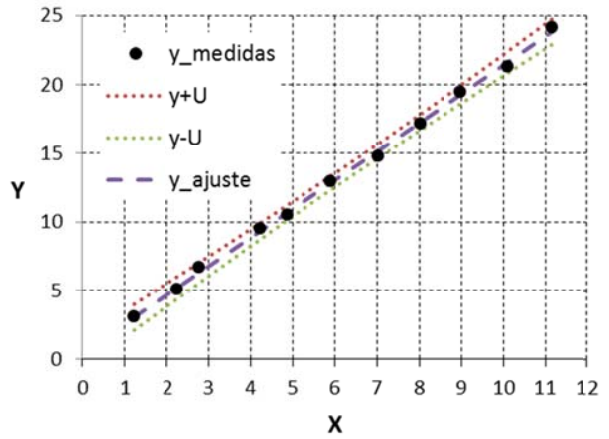


Fig. 2. Recta de ajuste e incertidumbre asociada obtenidas conjuntamente.

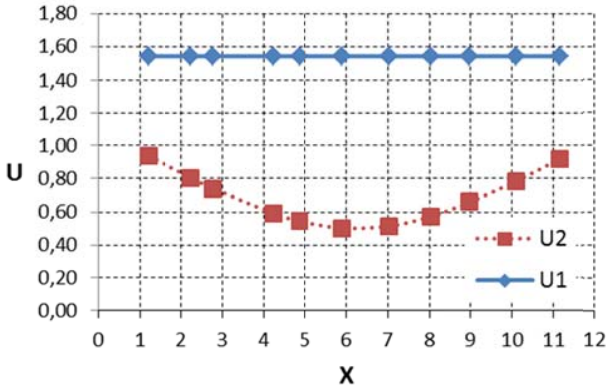


Fig. 3. Incertidubres obtenidas por los dos métodos.

V. Resultados

En la Tabla II se presentan los resultados de las encuestas anónimas realizadas a un total de 7 alumnos correspondientes al curso 2017/2018.

De los resultados se puede desprender que, salvo una tercera parte, los demás alumnos tenían un bajo conocimiento de los temas relativos al cálculo de incertidumbres de medida. La mitad de los estudiantes (50%) declaran tener bastante conocimiento del método de regresión lineal y el 50% restante declaran tener poco (33%) o muy poco (17%).

En cuanto a la percepción de la necesidad en conocer el tema, más del 80% considera que es útil.

En lo que más unanimidad hay es en la pregunta relativa a la idoneidad de la metodología utilizada, en la que el 100% declara que es adecuada tanto para aprender como para aplicarla a los casos prácticos.

Los alumnos perciben un grado de dificultad en los temas de cálculo de incertidumbres similares al resto de materias del máster. Y también consideran mayoritariamente que la metodología seguida para profundizar en el cálculo de incertidumbres es más adecuada para tratar en el máster que en el grado. Esto se puede deber a que, aunque se podría incluir en el grado, la forma de aplicarlo requiere de una buena base de conocimientos previos.

VI. Conclusiones

Se ha presentado la metodología utilizada en la asignatura de Acondicionadores de Señal para la evaluación de incertidumbres de medida cuando se obtiene la curva de calibración de un sistema de medida.

Se ha expuesto una solución para tratar los datos de medición cuando se repiten los experimentos y se desea evaluar la incertidumbre específicamente para cada zona del rango de medida.

La incertidumbre asociada a la curva de calibración resulta ser otra curva de un grado mayor.

La metodología de enseñanza es sencilla y con ella se obtienen buenos resultados, por lo que es idónea para aplicar en la docencia práctica de laboratorio.

De las encuestas a los alumnos se puede concluir que el estudio de la evaluación de incertidumbre aplicado a los circuitos de medida y los sensores es un tema necesario y que no habían estudiado con anterioridad. Además, los alumnos han valorado positivamente la metodología seguida y le han atribuido un nivel de dificultada similar al del resto de materias del master. Es importante resaltar, también, que los alumnos consideran adecuado profundizar en estos temas en al máster.

TABLA II. RESULTADO DE LA ENCUESTA REALIZADA A LOS ALUMNOS.

	Pregunta	Nada	Muy poco	Poco	Bastante	Mucho
1	¿En qué grado sabías que actualmente se utiliza el método de evaluación de incertidumbres de medida en vez del método clásico de cálculo de errores de medida?	17%	17%	33%	33%	0%
2	¿Cómo evalúas el grado de conocimiento que tenías sobre el tema de introducción a la metrología estudiado en la asignatura ACS?	0%	34%	33%	33%	0%
3	¿Cómo evalúas el grado de conocimiento que tenías sobre la Ley de Propagación de Incertidumbres?	16%	16%	68%	0%	0%
4	¿Cómo evalúas el grado de conocimiento que tenías sobre el método de cálculo de la recta de tendencia obtenida con una regresión lineal por mínimos cuadrados?	0%	17%	33%	50%	0%
5	¿Cómo calificas el conocimiento que tenías sobre la evaluación de incertidumbres en una curva de calibración con el método de máxima verosimilitud?	17%	17%	66%	0%	0%
6	¿En qué grado consideras útil conocer el tema de evaluación de incertidumbres de medida para el campo de la instrumentación de medida?	0%	0%	16%	50%	34%
7	¿Consideras apropiada la metodología utilizada para aprender el tema de evaluación de incertidumbres de medida?	0%	0%	0%	67%	33%
8	¿Consideras apropiada la metodología utilizada para aplicar los métodos aprendidos a los casos prácticos de sistemas de medida realizados en el laboratorio?	0%	0%	0%	67%	33%
9	¿En general, comparado con el resto de temas tratados en el Master, qué grado de dificultad le atribuyes al tema de evaluación de incertidumbres de medida estudiado en ACS?	0%	0%	33%	67%	0%
10	¿En qué medida consideras que el tema de evaluación de incertidumbres de medida estudiado en ACS es más adecuado para el Máster o debería ser incluido en el Grado?	0%	0%	0%	83%	17%

REFERENCIAS

[1] Guía docente de la asignatura de "Acondicionadores de señal," Universidad de Vigo. [En línea]. Disponible: https://secretaria.uvigo.gal/docnet-nuevo/guia_docent/?centre=305&ensenyament=V05M145V01&assignatura=V05M145V01331

[2] Stephanie Bell, "A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement," Measurement Good Practice Guide no. 11 (Issue 2). National Physical Laboratory Teddington, Middlesex, United Kingdom, marzo 2001.

[3] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 1st edition, 1993, corrected and reprinted 1995, International Organization for Standardization (Geneva, Switzerland).

[4] Evaluación de datos de medición: Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. Centro Español de Metrología. Edición digital 1 en español 2008 (traducción 1ª Ed. sept. 2008, original en inglés).

[5] Raghu Kacker, Klaus-Dieter Sommer y Rudiger Kessel, "Evolution of modern approaches to express uncertainty in measurement," Metrologia, vol. 44, pp. 513-529, 2007.

[6] Philip R. Bemington y D. Keith Robinson, Data Reduction and Error Analysis. McGraw-Hill, 2003.

[7] Vicente Novo Sanjurjo. Estadística Teórica y aplicada. Editorial UNED, 1995, pp. 585-660.

SESIÓN V.A: SISTEMAS DIGITALES 2

SICOME 2.0: A teaching simulator for Computer Architecture

María Brox, Andrés Gersnoviez, Miguel A. Montijano, Ezequiel Herruzo, Carlos D. Moreno
Dept. Electronic and Computer Engineering
Escuela Politécnica Superior, Universidad de Córdoba
Córdoba, Spain
[mbrox, andresgm, el1movim, eze, cdiego]@uco.es

***Abstract*—As it is well known, teaching simulators are very useful resources to teach the practices of the subjects and that students understand in a more optimal way the theoretical concepts taught. Specifically, this work presents a teaching simulator, SICOME 2.0, which is used in the practices of Computer Architecture and allows an interactive simulation on a Simple Computer Architecture. The work also describes the practices carried out in the subject with this simulator. The experience with this simulator is very satisfactory and the results obtained show that it helps to improve the comprehension of the subject.**

Keywords—Teaching simulator, Computer Architecture practices, Simple Computer Architecture system

I. INTRODUCTION

The use of simulators in practices is a very useful tool that helps to improve the comprehension of the subjects [1]-[5]. Specifically, the teaching area of Computer Architecture at the University of Cordoba has developed a set of simulators that are used as resources in the teaching of subjects related to this area [6]-[8].

On the other hand, in Computer Architecture, a system based on a Simple Computer Architecture [9]-[10] is a tool widely used to explain fundamental aspects of the subject. Based on this system, a teaching simulator (SICOME 1.0) [8] was developed. However, this simulator presented a set of problems that made it difficult to develop the practices. Among the main disadvantages of this simulator were that in SICOME 1.0, the micro-programmed controller was the only one existing in the computer and besides, the bifurcation control logic (LCB) was already defined previously, so the user only had to analyze the truth table of the control logic to decide which would be the coding used in each case.

For this reason, it has been decided to correct these shortcomings presented in the previous simulator and a second version (SICOME 2.0) has been developed based on the Java architecture of Sun Microsystems that significantly improves the previous teaching environment. This new version can work by implementing a micro-programmed or hardwired unit control, allowing students to analyze the differences between creating an instruction set in one way or another. The truth table for the control logic in micro-programmed control is not previously defined as in the older version so that the user has to define it and introduce it in the computer through a graphical interface. This allows the development of a greater number of instructions and students acquire a better knowledge of the subject by creating their own control logic. This version also includes a greater number of microoperations compared to the previous version, which also facilitates the development of a greater number of instructions by performing them in a more optimal way.

The structure of the article is as follows. A detailed description of SICOME 2.0 is included in section II. Section III shows the practices of Computer Architecture developed with this simulator. A description of the experience of using this simulator in practices is included in Results section. Finally, the article ends by showing the conclusions of the work.

II. DESCRIPTION OF SICOME 2.0

The simulator consists of a graphical interface that includes a menu bar and tools, a Simple Computer Architecture scheme, a representation of the contents of the computer's memory, and a status console. An illustration of the graphical interface of SICOME 2.0 is shown in Fig. 1. The Simple Computer Architecture scheme shows the contents of the registers and memory, controller, arithmetic/logic unit and the available set of microoperations. As it is illustrated in Fig. 1 the arithmetic/logic unit control includes a QR register for the development of multiplication and division algorithms. The memory display consists of a series of fields indicating the addresses, the contents of these addresses and the instruction to which it is equivalent according to the instruction set that is loaded at any given time. Finally, the status console allows the user to know the state of the simulation.

It should be noted that the simulator can work by implementing a micro-programmed or hardwired control unit. The graphical representation of the micro-programmed controller is shown in Fig. 2. This figure also includes the flags that can be used in the control logic which it has to be introduced by the user as it will be described in the subsection III-B. As it is shown, the controller has a sequence counter register (SC) that allows making loops in the instructions. CROM is a memory whose output is the activation code of the computer terminals, associated LCB code and jump direction in the instruction or load value of the SC register (when it is applicable); CMAR is a counter register whose output is the input address of the CROM. Mapping logic converts the code provided by the OPR register into the address where the corresponding instruction begins in the CROM; the LCB,

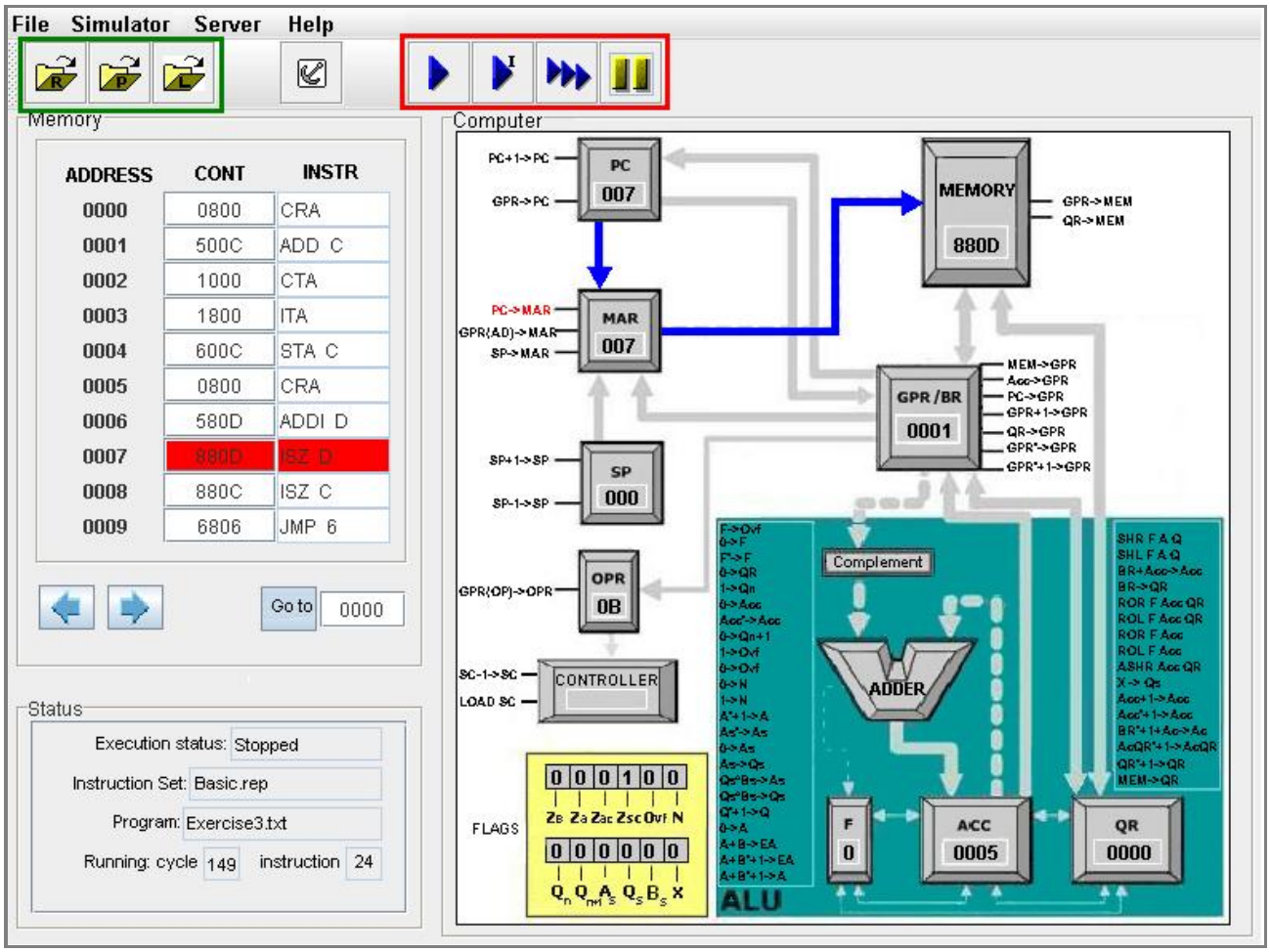


Fig. 1. SICOME graphical interface

according to the code provided by the CROM and flags, determines whether the CMAR should be increased (output I) or load the address provided by the CROM (output B) or that provided by the mapping logic (output R). The LCB also determines if the activation of computer terminals provided by the CROM is enabled (output E).

Fig. 3 shows the graphical representation of the hardwired control unit. It includes the OPR register and the internal counter of the controller. It also has, like the micro-programmed controller, a SC register. In the center of the figure, instruction and time decoders are illustrated, which together with the flags will activate some of the existing microoperations, once these signals go through the block that simulates the control of the logic gates. This last block represents the activation logic of the microoperations in hardwired control and it must be defined by the user, as it will be described in section III-C.

Other important feature of this simulator is that the datapath of an instruction through each stage is highlighted with different colors allowing to analyze signals and buses that are activated during the simulation as well as analyzing the content of the registers and memory. Finally, it should be noted that the simulator also includes tools that allow to carry out a continuous simulation, execute a complete instruction or to simulate cycle by cycle.

III. COMPUTER ARCHITECTURE PRACTICES USING SICOME 2.0

With SICOME 2.0, three practices of the subject Computer Architecture of second course of Computer Engineering at the University of Cordoba, are developed. The aim of this subject is to provide students with the basic knowledge of the different units that form a computer based on Von Neumann Structure/Architecture. In this subject the units of calculation, control, memory, and input/output of a computer are studied, taking as a reference the structure of a Simple Computer Architecture. Other practices of the subject are developed with OrCAD software and consist of designing a control unit using shift registers for the architecture of a Simple Calculator that is provided already designed to the students. With this software, students also design micro-programmed or wired control units for a Simple Computer Architecture studied in the subject.

The practices developed with SICOME 2.0 and their detailed development, are described below.

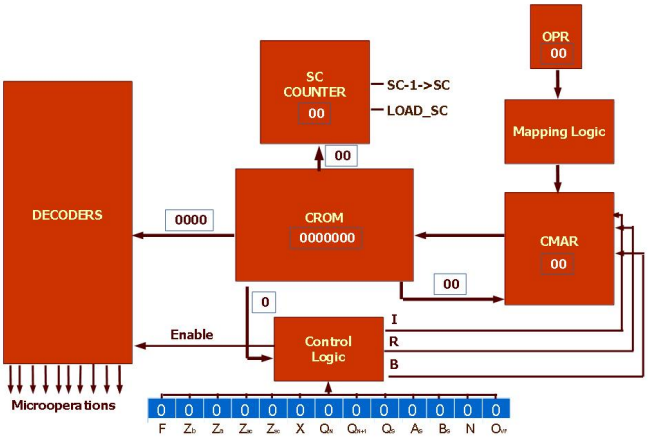


Fig. 2. Graphical representation of the micro-programmed controller

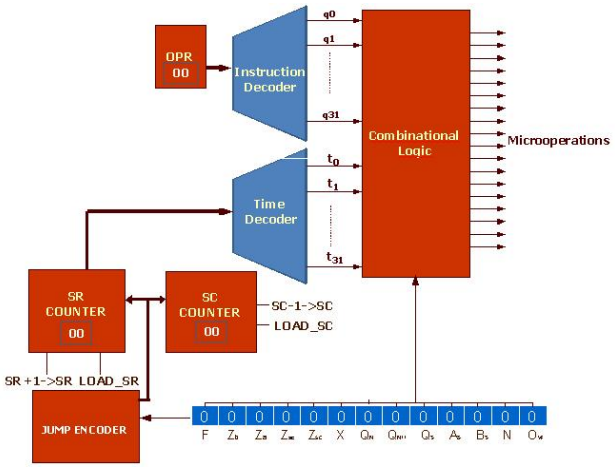


Fig. 3. Graphical representation of the hardwired control unit

A. *Introduction to SICOME 2.0*

The first practice is dedicated to being an introduction to the simulator where students develop three test programs and simulate them using an instruction set and a control logic provided. The instruction set provided includes basic instructions of addition, storage, jump, clear, rotation, negation, increment, subroutine calling, and execution stop. With this basic instruction set three programs have to be carried out. The first one performs a program that calculates the subtraction of two numbers stored in memory, storing the result in a memory location. The subtraction operation must be implemented as the sum of the minuend and the two's complement of the subtrahend. The second exercise is based on a program that calculates the sum of the absolute values of two numbers stored in memory. The result of the addition must also be stored in a memory location. In this program, students must perform a subroutine that calculates the absolute value of a number by making several calls to this subroutine. Finally the third exercise carries out a program that calculates the sum of a set of numbers stored in a memory table and stores the result in the accumulator register. The table size is known and indicated in a memory location. For this exercise students must perform a loop that does the addition operation the same number of times that elements to add are included in the table. The code of the third programm is shown in Fig. 4 where the code structure of the programs in SICOME is illustrated. A program includes three different sections. Each section is separated from the next section by the character "@". The first section is for the area of declaration of variables where it is necessary to specify its storage address in memory followed by its value, both in hexadecimal code. In the example shown in Fig. 4, memory location C includes the number of elements to be added, while the next memory location indicates the position of the first element to be added; this position will be increased to add the rest of the numbers in the table whose values have been stored in memory location E to address 12. The next section indicates the starting memory address of the program. Finally, the code includes the program instructions. Programs can also include comments that must be preceded by the "#" character and must be included in their own line so that a same line of code cannot contain a program instruction and comment. Instruction set, program and control logic are text files that are loaded into SICOME using the buttons that include "R", "P" and "L" symbols in the menu bar and that have been highlighted with a green rectangle in Fig. 1. Once the program is loaded, it is included in the SICOME memory display as it is shown in Fig. 1. The simulation tools are highlighted in a red rectangle and allow to simulate cycle by cycle, execute a complete instruction, perform a continuous simulation or stop the execution of the program. Using these tools, the program is simulated and the result of the sum of the five numbers included in the table is stored in the

```
#Area of declaration of variables
C 5
D E
E  1
F  1
10 1
11 1
12 1
@
#Starting memory address of the programm
0
@
CRA
ADD C
CTA
ITA
STA C
CRA
ADDI D
ISZ D
ISZ C
JMP 6
STA 13
HALT
@
```

Fig. 4. Structure of a program in SICOME

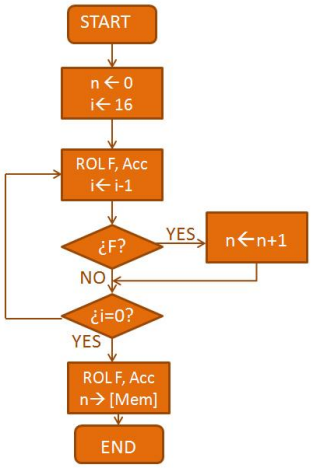


Fig. 5. Flow diagram of ONES instruction

Accumulator register, as it is shown in Fig. 1. Once the program execution is finished, the simulator also allows to clear memory to load a new program, restart the computer to run a new simulation, or reset the computer to introduce a new instruction set, program and control logic.

B. Design of an instruction set in a micro-programmed control unit

In this second practice, students design an instruction set for a micro-programmed control unit. They also have to develop the control logic and carry out test programs, such as those proposed in practice 1, to check that the instruction set has been developed correctly. The proposed instruction set is modified each academic course. An example of an instruction set is the following:

- FECTH
- HALT
- LDA m: It loads the contents of m memory location into the Accumulator register
- ONES m: It counts the number of ones in the Accumulator register and stores it in m memory position

Table I. RTL table of ONES instruction in a micro-programmed unit control

CYCLE	MICROOPERATIONS	NEXT
ADDR(ONES)+0	0→QR; 16→SC	Increase
ADDR(ONES)+1	QR→GPR	Increase
ADDR(ONES)+2	ROL F, Acc; SC-1→SC	Increase
ADDR(ONES)+3	GPR+1→GPR (if F=1)	If Zsc=0 jump to ADDR(ONES)+2 If Zsc=1 increase
ADDR(ONES)+4	ROL F, Acc; GPR→M	Jump to ADDR(FETCH)

The flow diagram of ONES instruction is shown in Fig. 5. In order to count the number of ones, a loop of 16 iterations is performed (because SICOME registers have a size of 16 bits) where rotations to the left of the Accumulator are implemented, so that the most significant bit of this register is shifted to F register. Once the rotation has been carried out, if the value of F is one, n variable, that stores the number of ones in the Accumulator register, is increased. For each one of the instructions, students have to develop an RTL table as shown in Table I for ONES instruction. In this Table the flow diagram of Fig. 5 is described with computer microoperations. To make the loop, the SC register has been used which has a load microoperation of a value (in this case it is loaded with value 16) and a decrement microoperation which is used to decrease the value of the register in a unit each time an iteration is performed. There is a flag bit on the computer, Z_{sc}, which is one if SC register is zero. Each time an iteration of the loop is performed, the value of Z_{sc} is analyzed to know if the loop has finished or there is a new iteration, jumping in this case to the starting direction of the loop. The general purpose register GPR is used to store the number of ones of the accumulator register.

In parallel to the construction of RTL table, students develop the truth table of control logic (Table II). This table includes four control bits (B_3, B_2, B_1 and B_0 bits) and flags bits (F, Zb, Za, Zac...) that can take the values of 0, 1 and X indicating the indifference of the selected flag. For each combination of control bits, the values of the different outputs available from CMAR (I, B, R and E) are indicated. For this example, the four control fields common to all instruction sets are included. There is a combination for the case in which the

Table II. Truth table of control logic

B_3	B_2	B_1	B_0	F	Z_b	Z_a	Z_{ac}	Z_{sc}	X	Q_n	Q_{n+1}	A_s	Q_s	B_s	N	I	B	R	E
0	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	0	0	0
0	0	0	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	1	0	0	1
0	0	1	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	1	0	1
0	0	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	0	1	1
0	1	0	0	0	X	X	X	0	X	X	X	X	X	X	X	0	1	0	0
0	1	0	0	0	X	X	X	1	X	X	X	X	X	X	X	1	0	0	0
0	1	0	0	1	X	X	X	0	X	X	X	X	X	X	X	0	1	0	1
0	1	0	0	1	X	X	X	1	X	X	X	X	X	X	X	1	0	0	1

Table III. CROM Table

Cycle	MAR		OPR AND MEM		SP, PC AND SC			ALU						GPR			CONTROL LOGIC				DIRECTIONS AND LOAD OF SC COUNTER								HEX CODE	
	S_{15}	S_{14}	S_{13}	S_{12}	S_{11}	S_{10}	S_9	S_8	S_7	S_6	S_5	S_4	S_3	S_2	S_1	S_0	B_3	B_2	B_1	B_0	M_7	M_6	M_5	M_4	M_3	M_2	M_1	M_0		
FETCH																														
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	PC→MAR	4000100
1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	M→GPR; PC+1→PC	0201100
2	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	GPR(OP)→OPR; GPR(AD)→MAR	B000300
HALT																														
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0000000
LDA																														
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0→Acc; M→GPR	0009100
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	GPR+Acc→Acc	0028200
					LOAD SC			0→QR						ONES							16									
6	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0→QR; 16(Dec)->SC	0A40110
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	QR→GPR	0005100
8	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	ROL F, Acc; SC-1→SC	0C30100
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	GPR+1→GPR (if F=1)	0004408
A	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ROL F, Acc; GPR→M	1030200
	1		0		3			0						2			0				0									

CMAR is increased (output I=1); the specific field for when the address provided by the CROM is loaded (B=1); the case associated when the address provided by the mapping logic (R=1) is loaded; and finally, a specific combination for stopping the execution of the program where the four outputs of CMAR have zero value. For the particular case of this instruction set, a combination of control bits has been designed that uses F and Zsc flags simultaneously. If F bit is one, E output is activated to enable the increment of GPR register because a bit of Accumulator with value one has been detected; if F is zero, this increment will not be enabled. On the other hand, Zsc controls that the loop is finished, activating I output to exit of the loop or jumping to the start direction of the loop. This truth table of the control logic can be included in a text file and loaded in SICOME but the user can also specify it using a graphical interface included in the simulator.

Finally, students must store the microprograms corresponding to the instruction set in the CROM memory. The microwords stored by the CROM have a length of 28 bits, of which the first 16 are used as encoding signals for microoperations, the next 4 as control signals, and the last 8 as addressing signals or load value of SC counter, as shown in Table III. This table includes the coding of fetch cycle and execution cycle for HALT, LDA and ONES instructions using microwords. The combinations of bits to code the different microoperations (bits s15 to s0) can be found in SICOME Help. Once the microwords have been completed, a 7-digit hexadecimal coding is obtained and included in the instruction set file.

```
$
CB 4000100
CB 201100
CB B000300
$
HALT false 0
LDA true 0009100 0028200
ONES true 0A40110 0005100 0C30100 0004408 1030200
```

Fig. 6. Structure of an instruction set using micro-programmed control in SICOME

The instruction set file using micro-programmed control is a text file in which the name of the instruction is defined, as well as its corresponding microprogram. In each line of the file, an instruction is declared with the following fields separated by spaces: the name of the instruction; a flag that indicates if the instruction has a parameter or not; and finally the microprogram of the instruction composed of the sequence of hex-coded microwords that was obtained in Table III. For the example included in this description, the instruction set file is illustrated in Fig. 6. To check that the instruction set and control logic developed work well, students perform a small test as shown in Fig. 7 where the Accumulator register with the contents of 0 memory position is loaded. The ONES instruction is then used to count the number of ones of the Accumulator register and store this count in 1 memory position. The instruction set, program and control logic files are loaded in SICOME using "R","P" and "L" buttons and then a simulation can be performed. At the end of the simulation, it is checked if the count stored in 1 position coincides with the number of ones of Accumulator register to detect if there has been any error in the development of the instruction set or control logic.

```
0 1C75
@
10
@
LDA 0
ONES 1
HALT
```

Fig. 7. Test program

Table IV. RTL table of ONES instruction in a hardwired unit control

CONDITIONS	MICROOPERATIONS	NEXT
FETCH		
t_0	PC→MAR	SR+1→SR
t_1	PC+1→PC; M→GPR	SR+1→SR
t_2	GPR(OP)→OPR; GPR(AD)→MAR	SR+1→SR
LDA		
$q_1.t_3$	0→Acc; M→GPR	SR+1→SR
$q_1.t_4$	GPR+Acc→Acc	0→SR
ONES		
$q_2.t_3$	0→QR; 16→SC	SR+1→SR
$q_2.t_4$	QR→GPR	SR+1→SR
$q_2.t_5$	ROL F, Acc; SC-1→SC	SR+1→SR
$q_2.t_6.F$	GPR+1→GPR	
$q_2.t_6.Z_{SC}$		SR+1→SR
$q_2.t_6.Z'_{SC}$		5→SR
$q_2.t_7$	ROL F, Acc; GPR→M	0→SR

C. Design of an instruction set in a hardwired control unit

In the third practice the students develop the same instruction set of the previous practice but using hardwired control unit. Similarly to the previous practice, the RTL table of each instruction must be designed. The RTL table of ONES instruction using hardwired control is shown in Table IV.

Once this table has been finished, students can obtain the control expressions that activate each one of the microoperations and that for this particular case are shown in Table V. These control expressions can be included in the simulator using a text file whose format is shown in Fig. 8. As can be seen in the figure, the text starts with the special $ symbol and places each microoperation in a different line. The name of each microoperation is followed by all expressions that are part of the logic function of that microoperation. The user can use this text file and load it into the simulator using "L" button or SICOME also has a graphical interface that allows the user to define the logic of microoperations activation.

Table V. Control Expressions

MICROOPERATION	CONTROL EXPRESSIONS
GENERIC OPERATIONS	
PC→MAR	t_0
PC+1→PC	t_1
M→GPR	$t_1+q_1.t_3$
GPR(OP)→OPR	t_2
GPR(AD)→MAR	t_2
0→Acc	$q_1.t_3$
GPR+Acc→Acc	$q_1.t_4$
0→QR	$q_2.t_3$
QR→GPR	$q_2.t_4$
ROL F, Acc	$q_2.t_5+q_2.t_7$
GPR+1→GPR	$q_2.t_6.F$
GPR→M	$q_2.t_7$
SR OPERATIONS	
SR+1→SR	$t_0+t_1+ t_2+ q_1.t_3+ q_2.t_3+ q_2.t_4+ q_2.t_5+ q_2.t_6.Z_{SC}$
LOAD SR	$q_1.t_4(0)+ q_2.t_6.Z'_{SC}(5)+q_2.t_7(0)$
SC OPERATIONS	
SC-1→SC	$q_2.t_5$
LOAD SC	$q_2.t_3(16)$

```
$
PC->MAR: t0
PC+1->PC: t1
M->GPR: t1 + t3·q1
GPR(OP)->OPR: t2
GPR(AD)->MAR: t2
0->ACC: t3·q1
GPR+ACC->ACC: t4·q1
0->QR: t3·q2
QR->GPR: t4·q2
ROL FA: t5·q2 + t7·q2
GPR+1->GPR: t6·q2·F
GPR->M: t7·q2
$
SR+1->SR: t0 + t1 + t2 + t3·q1 + t3·q2 + t4·q2 + t5·q2 +
t6·q2·Zsc
LOAD SR: t4·q1-0 + t6·q2·Zsc'-5 + t7·q2-0
SC-1->SC: t5·q2
LOAD SC: t3·q2-16
$
```

Fig. 8. Text file of control expressions in SICOME

The instruction set file in this case is shown in Fig. 9.

```
HALT false 0 q0
LDA true 2 q1
ONES true 5 q2
```

Fig. 9. Structure of an instruction set using hardwired control in SICOME

Each line of the file declares an instruction that consists of the following fields separated by spaces: name of the instruction; flag that indicates whether the instruction has a parameter or not; the number of cycles of the instruction; and the identifier of the instruction where the letter q is used followed by an index that must match with the order in which the instruction has been defined in the directory. By loading the set instruction, the activation logic and using the same test program shown in Fig. 7 a simulation can be performed to verify that the instruction set is correct.

IV. RESULTS

The use of SICOME 2.0 in Computer Architecture practices has allowed to verify that students improve the theoretical knowledge learned because the simulator allows them to analyze signals and buses that are activated during the simulation as well as analyzing the content of the registers and memory.

Another aspect that is very important to understand the structure of a Simple Computer Architecture is that the simulator allows them to carry out a continuous simulation, execute a complete instruction or to simulate cycle by cycle, so that they can easily detect errors in the design of the programs and instruction set developed.

On the other hand, the structure of the practices also allows them to analyze differences by creating a same instruction set on a micro-programmed and hardwired control unit.

The evaluation of the practices is continuous so that the attendance and attitude of the students in the development of them is evaluated in the final qualification. The students must explain to the teachers each of the proposed practices showing that the practices are correct and have understood the objectives of each one of them and the results obtained. For the first practice only one session is used, while for the second and third, two sessions are necessary. There are also more tutoring sessions so that students can finish the practices, ask any questions and defend them in case they have finished them. The simulator software is also provided to students for installation on their personal computers and they can work with it outside the laboratory, analyzing the functioning of some complex instructions that are studied in theoretical classes or problems. Following this evaluation method, 97% of the students approved the practical part of the subject during the last academic year.

V. CONCLUSIONS

A new version of a simulator for the teaching of Computer Architecture has been presented. The great functionality offered by the simulator ensures that SICOME 2.0 is a high quality teaching tool. The students and teachers of this subject are very satisfied with the great advance in the learning of students using the simulator in the practices, and consider that SICOME 2.0 allows them to reach a high level of comprehension in the subject.

REFERENCES

[1] Contreras, G.A., García, R., Ramírez, M.S., "Uso de simuladores como recurso digital para la transferencia del conocimiento", Revista de Innovación Educativa, vol.2, no.1, pp.86-100, 2010

[2] Nikolic, B., Radivojevi, Z., Djordjevi, J., Milutinovic, V., "A Survey and Evaluation of Simulators Suitable for Teaching Courses in Computer Architecture and Organization", IEEE Transactions on Education, vol.52, no.4, 2009

[3] Yehezke, C., Yurzik, W., Pearson, M., Armstrong, D., "Three simulator tools for teaching computer architecture: Easy CPU, Little Man Computer, and RTLSim", ACM Journal Educational Resources in Computing, vol.1, no.4, pp. 60-80, 2001

[4] Aguilar, I., Heredia, J.R., "Simuladores y laboratorios virtuales para Ingeniería en Computación", 2º Congreso Virtual sobre Tecnología, Educación y Sociedad (CTES), Mexico, 2013

[5] Grossi, M.D., Jiménez Rey, E., Servetto, A., Perichinsky, G., "Un simulador de una máquina computadora como herramienta para la enseñanza de la arquitectura de computadoras", I Jornadas de Educación en Informática y TICs en Argentina, 2005

[6] Benavides, J.I., Herruzo, E., Paloamres, J.M., "Herramientas docentes basadas en Internet para la docencia de Arquitectura de Computadores", Congreso Uruguayo de Informática y CLEI (infoUYclei 2002), Montevideo, 2002

[7] Herruzo, E., Benavides, J.I., Saez, E., Montijano. M.A., Paloamres, J.M., "Desarrollo de simuladores de Arquitectura de Computadores y su aplicación en la enseñanza", Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica (TAEE 2002), Las Palmas de Gran Canaria, 2002

[8] Conde, S., Muñoz, A., Herruzo, E., Benavides, J.I., "Aplicación interactiva de simulación del comportamiento de una Computadora sencilla con fines docentes", IX Congreso Universitario de Innovación Educativa en las Enseñanzas Técnicas, Vigo, 2001

[9] Taub, H., 'Digital Circuits and Microprocessors', McGraw-Hill, 1983

[10] Morris Mano, M., 'Computer Architecture', Ed. Prentice-Hall S.A., 1983

UCOMIPSIM 2.0: Pipelined MIPS Architecture Simulator

Andrés Gersnoviez, María Brox, Miguel A. Montijano, Juan A. Sújar and Carlos D. Moreno
Dept. Electronic and Computer Engineering
Escuela Politécnica Superior, Universidad de Córdoba
Córdoba, Spain
[andresgm, mbrox, el1movim, i22suroj, el1momoc]@uco.es

***Abstract*—The objective of this work is the realization of an application in JAVA whose function will be to simulate the MIPS 32-bit architecture in pipelined computer with hardwired control unit, in order to help in the learning and understanding of this architecture by the students in Computer Architecture subjects. With it, students will be able to graphically visualize the datapath of multiple MIPS instructions passing through the different stages of the pipelined computer.**

Keywords—MIPS, Pipelined Computer, Teaching Simulator, Computer Architecture.

I. INTRODUCTION

The use of simulators has demonstrated that help the students to reach higher levels of comprehension on the subjects [1]-[6]. Specifically, the study of pipelined computers is difficult for the students of Computer Engineering; for this reason, the development of teaching tools that help to achieve a good understanding of pipelining dynamics, is very important. Nowadays there are applications that help with the learning of this architecture [7]-[13]. Among these applications one of the most relevant tools is MARS simulator [7]-[8]; MARS is a very good MIPS code execution simulator, but it lacks graphical visualization of the datapath. Other remarkable simulator of pipelined computers is MIPSim [9]; this simulator has graphical visualization of the datapath, but it lacks the *forwarding* and *hazard detection* units [14].

To solve the lack of these units, the teaching area of Computer Architecture at the University of Cordoba developed an earlier version of this simulator presented in this paper [10]. This first version has *forwarding* and *hazard detection* units, but it uses obsolete software and has an incomplete datapath that led to execution errors in some instructions.

Therefore, a new simulator based on the Java architecture of Sun Microsystems has been developed. This new teaching tool corrects the errors of the earlier version, as well as including a much wider instruction set.

The structure of the article is as follows. A brief summary of the MIPS pipeline, data and control hazards is included in Section II. The graphical interface of the UCOMIPSIM simulator, as well as its instruction set and some execution examples are presented in Section III. The reception of the simulator by students and their feedback is summarized in Section IV. The improvements that are expected to be included in future versions of the application are shown in Section V. Finally, the article concludes with Section V for conclusions.

II. MIPS PIPELINE

The pipeline strategy is based on separating the instruction datapath into a series of consecutive stages. In this way, different instructions can be executed at the same time. Each instruction passes sequentially through all the stages, so that each stage is executing a different instruction. Specifically, MIPS pipeline is composed of five stages: IF (instruction fetch from memory); ID (instruction decode), phase where the registers are read and the control signals of the instruction are generated; EX (instruction execution), where the result of a R-type operation or the address used for a branch or data memory access are calculated; MEM (memory access), where the data memory is accessed to read or write; and WB (write back), where the result is stored in the destination register [14].

The different stages are separated by registers where the data and control signals that will be necessary in later stages are stored. The name given to these registers is the composition of the stages that separate. Thus, IF/ID register is the one that separates IF and ID stages.

Pipeline does not improve the latency of instructions (number of cycles that pass from the time an instruction is searched until it is executed). In fact, it aggravates it, since most instructions do not need to go through the five stages of pipeline and it is imperative that these instructions go through all of them. However, the throughput is greatly improved, achieving, under ideal conditions, the performance of one instruction per clock cycle.

Emphasizing a commentary from the previous paragraph, conditions will not always be ideal, because conflicts may appear between instructions that are going through the pipeline. It may be that an instruction needs as source register a register that is going to be modified by an instruction that is still in the pipeline; or it may be that an instruction is going to change the program execution course and some instructions have already advanced in the pipeline that are not going to be executed in the new course. This is what is known as

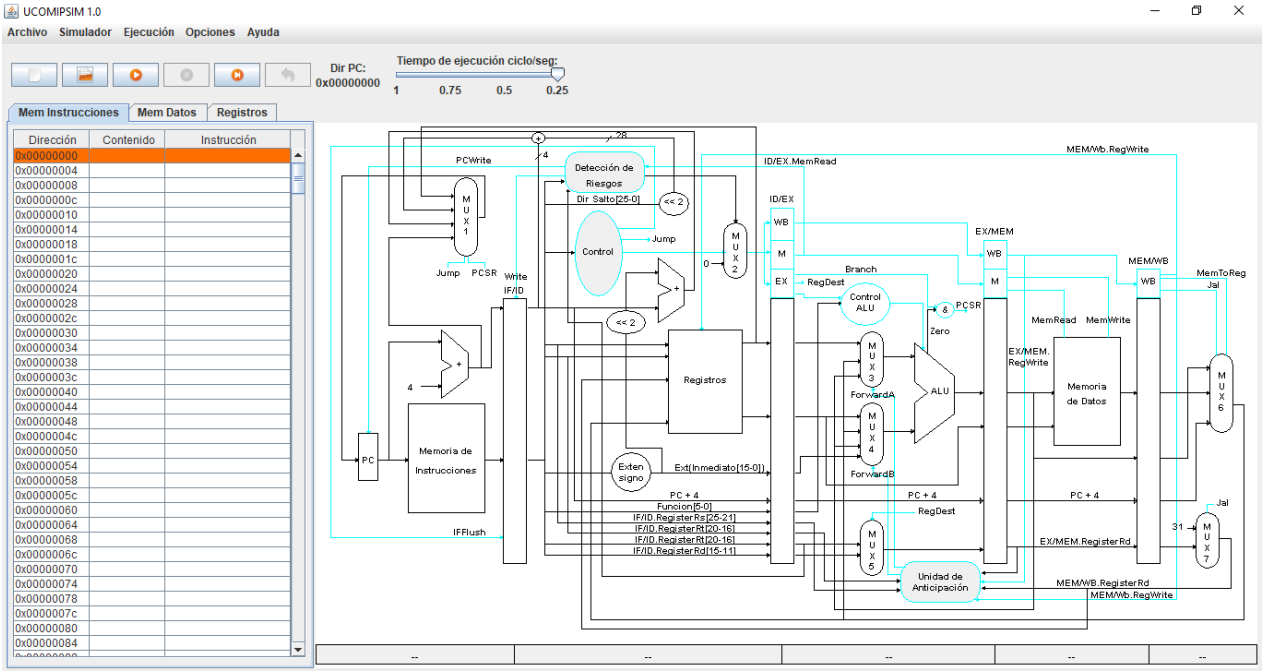


Fig. 1. UCOMIPSIM main window

"hazards" and there is a distinction between data and control hazards.

A. *Data hazards*

This is the case of instructions that use as source register a register that will be updated by an instruction that has not yet been executed. An example of this can be seen below:

```
add $1, $2, $3
sub $4, $5, $1
sw $6, 8($1)
```

As it can be appreciated, sub and sw instructions need $1 register for their calculations, but it will not be updated until add instruction is finished, having to stop, in principle, these two instructions until add instruction is finished.

The reality is that these instructions do not need to be stopped, because the new value of $1 can be known before add is finished. Specifically, the new value of $1 is calculated in the EX stage of add instruction and it is transferred to EX/MEN and MEM/WB registers when it passes through the pipeline. On the other hand, sub and sw really need the new value of $1 is in their respective EX stages. Therefore, $1 source register used by the ALU in sub can be replaced by the destination register in EX/MEM and, in the case of lw, replace it by the destination register in MEM/WB.

For this reason, the *forwarding* unit is introduced and is used for detecting the dependencies between the registers in the pipeline, as well as replacing a source register of an instruction with the destination register stored in EX/MEM or MEM/WB when it is applicable.

However, the *forwarding* unit does not solve all the cases. If instead of being add the first instruction, it would have been lw, also using $1 as destination register, the *forwarding* unit solves the problem for sw, but not for sub, since the updated value of $1 will not be available until MEM stage of lw is finished. In other words, sub needs to wait for a cycle in order to access the correct data.

For these cases, the *hazard detection* unit is introduced. Specifically, when this happens, the instructions that are in stages IF and ID (sw and sub, respectively, in our example) are blocked for one cycle. In the EX stage a "bubble" is introduced, in which nothing is done, assigning all its control signals associated to zero, and it will be transferred along the pipeline until disappearing.

B. *Control hazards*

The other type of hazard happens when a “branch” instruction is presented. In this case, depending on a comparison of registers developed in EX stage, it is determined whether the program execution is still sequential or a branch happens. The hazard is created because the instructions that, at the time, are in IF and ID stages may not be correct.

In theory, MIPS assumes by default that the branch will not happen, leaving in the previous stages the instructions that follow in sequential order. In this way, if the branch does not happen, the throughput is not affected. However, when the branch happens, then those following instructions found in the pipeline must be discarded.

For this, the *hazard detection* unit has to be updated. Specifically, when the branch condition happens, a bubble must be introduced in the ID stage, while IF instruction is replaced.

III. UCOMIPSIM Simulator

UCOMIPSIM is an application developed in Java, which simulates the datapath explained in the previous section, including *forwarding* and *hazard detection* units. The image of the simulator graphical interface can be seen in Fig. 1. The

TABLE I. UCOMIPSIM INSTRUCTION SET

Instruction Type	Instructions
R	add, addu, sub, sll, srl, and, or, nor, xor, not, jr, slt.
I	addi, addiu, lw, sw, lb, sb, slti, sltiu, lui, beq, bne.
J	j, jal.
Pseudoinstruction	move, bgt, bge, blt, ble.

MIPS pipelined datapath is shown in it in a self-climbing image. The graphical interface includes the menu bar and toolbar at the top of the figure; and the instruction memory, data memory and registers can be accessed at the left of Fig.1

In the menu bar, the memories and registers can be initialized (by assigning them to zero), load a file with a program to simulate; to save the results of a program after it has been executed; to start a simulation, pause it, execute a simulation step by step or restart it; on the other hand, the starting values of the addresses of the instruction and data memories, as well as the initial value of the PC, can be configured; finally, an user manual of the application is available in the help.

The toolbar is composed of buttons that give direct access to the most frequently used menu actions. These are memory initialization, file loading, simulation startup, simulation pause, step-by-step simulation and simulation restart. There is also a bar to regulate the execution speed of the simulation.

A. *Instruction set*

UCOMIPSIM can operate with a short subset of instructions, but large enough for teaching purposes. The complete set is shown in Table I.

In order to be able to operate with this instruction set, the datapath explained in [14] has had to be expanded, especially for instructions such as j or even jal, as it will be seen in a later example. This decision was adopted to give a more detailed view of how MIPS computer works.

As it can be seen in the table, a number of widely used pseudoinstructions have also been included. When a file with pseudoinstructions is loaded into the simulator, the simulator translates these pseudoinstructions into computer instructions, just as the assembler would do it. In this way, students can better understand what pseudoinstructions actually become when these are executed by the computer.

B. *Execution examples*

When the execution of a program is simulated, instruction and data memories and the register bank can be manipulated directly from the simulator interface. However, a text file with the program data can also be created and loaded via the simulator. An example of this type of files is shown in Fig. 2. As it can be seen, the initializations of the instruction memory addresses (where the first program instruction begins), of data memory, PC and registers, can be specified in the file. Once this part is finished, the program is specified and comments can be included by using the "//" symbol.

Once the program is loaded, the instruction memory, placed on the left side of the interface, shows it. This memory illustrates the address of each memory word, its contents (both data in hexadecimal code) and the instruction corresponding to that code.

As it can be seen in the example of Fig. 2a, there are numerous data and control hazards.

One of the execution cycles of the program in Fig. 2a is shown in Fig. 3. First, in the instruction memory, it can be seen that bge pseudoinstruction has been converted into a slt instruction followed by a beq instruction, placing the registers to compare in the appropriate order.

In the figure it can be seen how each instruction has an associated color and the corresponding datapath for each one is highlighted in the same color.

In this case, sub is in WB stage, close to its end; sub is followed by slt, which is in MEM stage; beq is in EX stage; in ID stage there is a bubble; and, finally, srl is in IF stage.

Firstly, the data hazard between beq and slt must be highlighted. To make the branch or not, beq needs the result of slt. In this case, the *forwarding* unit provides the slt result and places it in the ALU (highlighted in green) to be processed by beq in its EX stage.

All the units and registers that appear in the simulator, just by clicking on them, will be open in a new window, showing a more detailed image of them. If in this cycle a click is done on the *forwarding* unit, a window will appear with the

```
// Initialization of memory addresses and PC
DIRECINSTRU[00000010]
DIRECDATOS[00000000]
PC[00000010]

// Initialization of registers:
$16 = 1
$17 = 4
$18 = 6
$19 = 20

// Data memory:
DATA[0000001C] = 14

// Program:
sll $8, $16, 1
add $9, $8, $17 // (Comments)
sub $10, $18, $9
bge $10, $0, 2
sll $9, $9, 3
add $12, $9, $8
srl $8, $8, 1
lw $10, 8($19)
```

(a)

```
// Initialization of memory addresses and PC
DIRECINSTRU[00000000]
DIRECDATOS[00000000]
PC[00000000]

// Initialization of registers:
$17 = 16

// Instrucciones:
move $16, $0 // i = 0
addi $18, $0, 5
sll $4, $16, 2 // a0=4i, label loop
move $5, $16 // a1=i
jal 13 // jal to rst2
sll $8, $16, 2
add $8, $17, $8 // t0=dir A[i]
sw $2, 0($8) // A[i]=v0
addi $16, $16, 1 // i=i+1
bne $16, $18, -8 // branch to loop
EMPTY
EMPTY
EMPTY
sub $2, $4, $5 // label rst2
sll $2, $2, 1
jr $31
```

(b)

Fig. 2. Examples of program files in UCOMIPSIM: (a) Example 1; (b) Example 2.

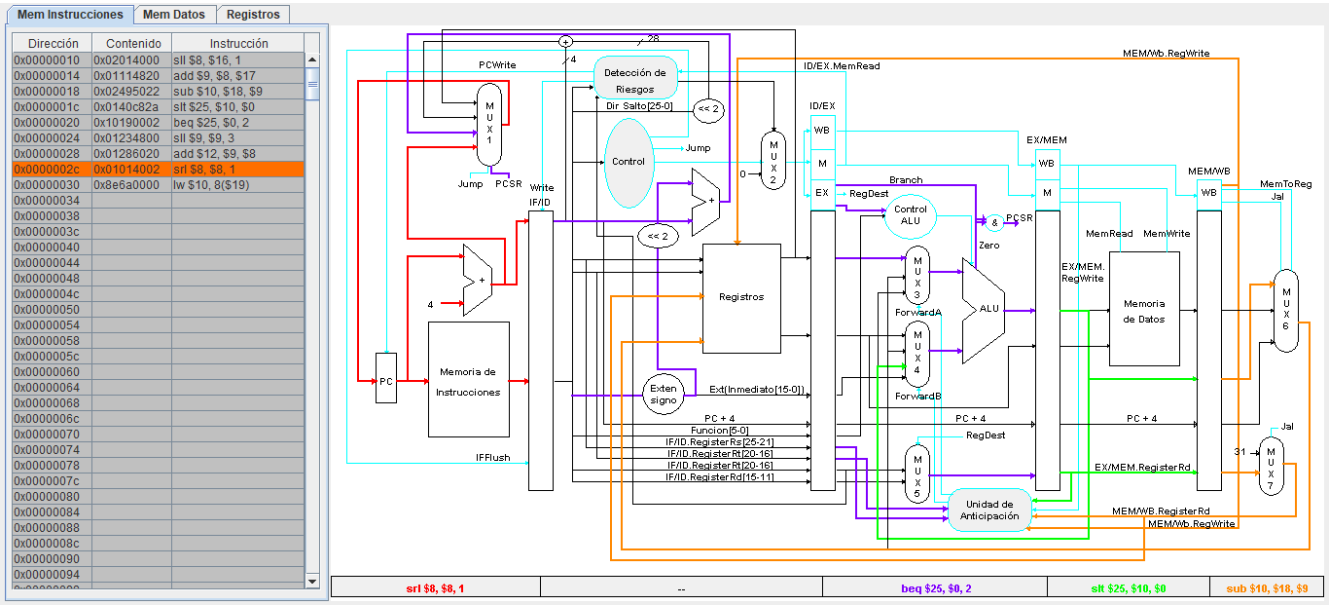


Fig. 3. Example of data and control hazards in a program execution in UCOMIPSIM

information of Fig. 4a. In this case it is possible to check the input and output values of this unit. In addition, the simulator allows to control the simulation course from this new window (start, stop, step-by-step or restart simulation). In the same way, a click on multiplexer 4 can be performed, checking its different input values and how, thanks to the signal provided by the *forwarding* unit (ForwardB), selects the value of rd register provided by EX/MEM register (Fig. 4b).

In second place, after beq is checked, there is a control hazard. Specifically, a branch must happen and the instruction that follows sequentially to beq (i. e. sll) is in ID stage. In this case, the hazard detection unit inserts a bubble into ID stage (as it is shown in Fig. 3), and replaces PC with the address calculated by beq, so the srl instruction appears in IF stage.

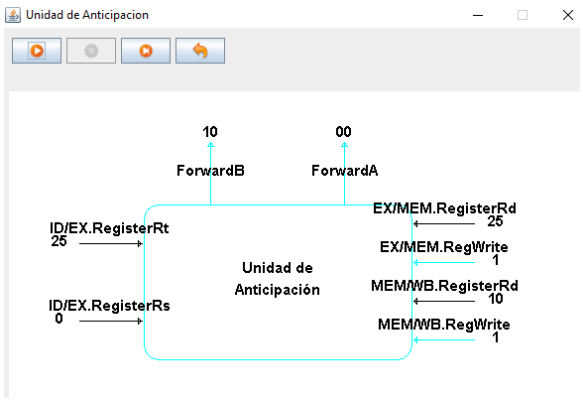
Finally, in addition to the instruction memory, the user can also analyze and modify the data memory and the register bank. This is shown in Fig. 3, next to the instruction memory, the tabs that give access to these sections. Once the execution of the program in Fig. 2 has been finished, the information of the data memory and the register bank is shown in Fig. 5a and 5b respectively.

In order to analyze the behavior of jal on this computer, the program in Fig. 2b is loaded into the application, as it can be seen Fig. 6. In this case, the datapath shown in [14] has been expanded. Specifically, PC+4 value has been propagated along the pipeline, at the same time that a control signal called "jal". When WB stage is reached, in addition to being able to choose between the result of the ALU and the data read from memory, the value of PC+4 is added. If jal control signal is active at this stage (as is the case in Fig. 6), multiplexer 7 will choose PC+4 as the data to save and the destination register will be $31, i. e., $ra.

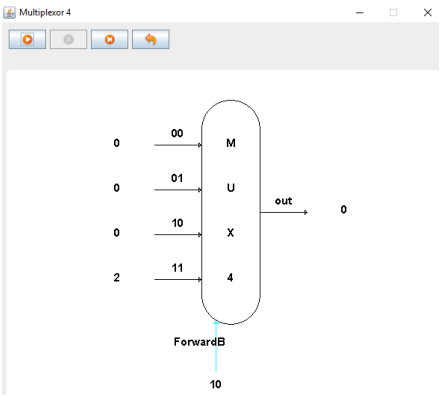
In the same figure, at the same time that jal is in stage WB, jr instruction is in ID stage. As it can be seen, the contents of $31 register are read and taken to PC, returning to the main program.

IV. UCOMIPSIM Reception and Feedback

Once a beta version of the application was finished, a version of it was provided to the students of the subject "Advanced Computer Architecture" of the degree in Computer Engineering at the University of Cordoba. The aim was to

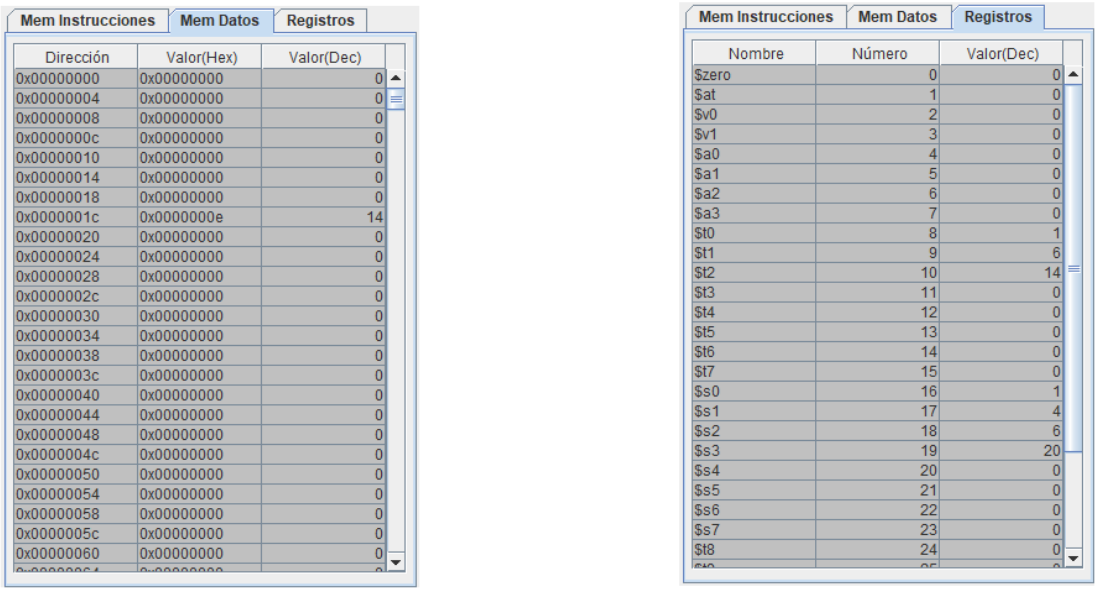


(a)



(b)

Fig. 4. Visualization of components in more detail (a) *Forwarding* unit; (b) Multiplexer 4



(a) (b)

Fig. 5. (a) Data memory; (b) Register bank

collect impressions and detect errors that had been ignored. In addition to the application, a template was provided where the students could describe their impressions, mistakes found and improvements on items that they would have liked to see in the application.

The impressions collected were very positive. Specifically, the students found it an user-friendly and intuitive application, greatly reinforcing the knowledge taught in the subject.

Among the proposed improvements, it was considered that the simulation could be executed at different speeds specified by the user; also that each time a component was clicked on, a new and independent window was opened with this component in greater detail, being able to have several windows of components open at the same time (initially it was a single window that was updated each time a new component was clicked); the students also proposed that it could be controlled from these same windows of components the simulation process; finally, they showed their interest to see the behavior of jal instruction (which was not included in the original instruction set of the application), which involved modifying the datapath presented in the application.

All these improvements were considered interesting and that could enhance the learning, so that these modifications

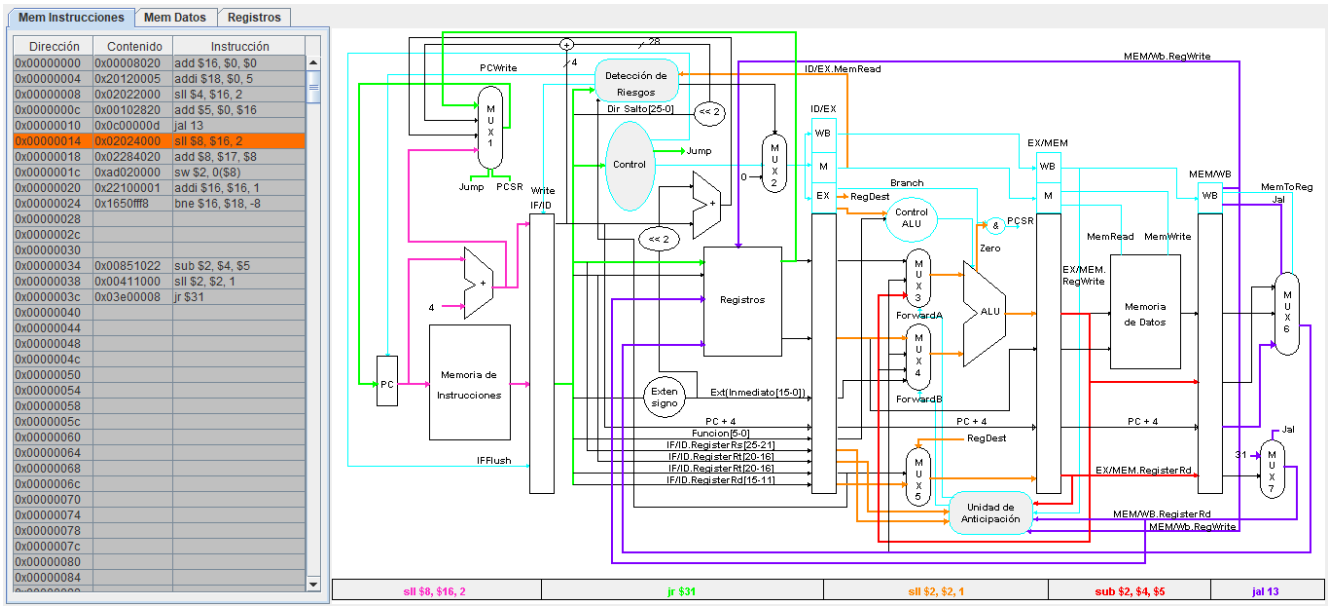


Fig. 6. Example of the behaviour of jal and jr in a program execution in UCOMIPSIM

were taken into account and included in the final version, as in the previous section it has been described.

V. FUTURE WORK

Among the improvements reserved for future versions of the application, there are some modifications that are priorities, such as those described below:

1. More detailed information of the components. Specifically, to show the circuits of some components, such as the *forwarding* and the *hazard detection* units, and how it is activated according to the progress of the program. Furthermore, to include summarized theoretical information of this component in order to reinforce the learning.
2. To include a small assembler, so that labels can be used, as well as the reordering of instructions that minimize the development of hazards.
3. To include, in addition to the pipelined computer, the option of simulating a non pipelined single-cycle MIPS computer.

VI. CONCLUSIONS

The learning of the pipeline of a datapath is fundamental for a computer engineer. When new instructions are added, as well as the *forwarding* and *hazard detection* units, the learning becomes more difficult. In this context, UCOMIPSIM simulator is used to easily show the execution of instructions on the MIPS pipelined computer. With this tool, students can analyze in detail what happens at each stage and in each component, especially when data and control hazards happen.

REFERENCES

[1] G.A. Contreras, R. García, and M.S. Ramírez, "Uso de simuladores como recurso digital para la transferencia del conocimiento", Revista de Innovación Educativa, vol.2, no.1, pp.86-100, 2010.

[2] B. Nikolic, Z. Radivojevi, J. Djordjevi, and V. Milutinovic, "A survey and evaluation of simulators suitable for teaching courses in computer architecture and organization", IEEE Transactions on Education, vol.52, no.4, 2009.

[3] C. Yehezke, W. Yurzik, M. Pearson, and D. Armstrong, "Three simulator tools for teaching computer architecture: Easy CPU, Little Man Computer, and RTLSim", ACM Journal Educational Resources in Computing, vol.1, no.4, pp. 60-80, 2001.

[4] I. Aguilar, and J.R. Heredia, "Simuladores y laboratorios virtuales para Ingeniería en Computación", 2º Congreso Virtual sobre Tecnología, Educación y Sociedad (CTES'2013), Mexico, 2013.

[5] M.D. Grossi, E. Jiménez-Rey, A. Servetto, and G. Perichinsky, "Un simulador de una máquina computadora como herramienta para la enseñanza de la arquitectura de computadoras", I Jornadas de Educación en Informática y TICs en Argentina, 2005.

[6] E. Herruzo, J.I. Benavides, E. Saez, M.A. Montijano, and J.M. Paloamres, "Desarrollo de simuladores de Arquitectura de Computadores y su aplicación en la enseñanza", Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica (TAEE'2002), Las Palmas de Gran Canaria, 2002

[7] MARS (MIPS Assembler and Runtime Simulator). Accessed: Jan. 13, 2018. [Online]. Available: http://courses.missouristate.edu/KenVollmar/mars

[8] K. Vollmar, and P. Sanderson, "MARS: An education-oriented MIPS assembly language simulator". In SIGCSE'06, pp. 239–243, ACM Press, NY, USA, 2006.

[9] H. Grünchbacher, and M. Khosravipour, "WinDLX and MIPSim pipeline simulators for teaching computer architecture", in Proc. of 1996 IEEE Symposium and Workshop on Engineering of Computer.Based Systems (ECBS'1996), pp. 412-417, 1996.

[10] J. Gómez-Luna, A. Palacios, E. Herruzo, and J.I. Benavides, "UCO.MIPSIM: Pipelined computer simulator for teaching purposes", in Proc. of VIII Congress on Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE'2008), pp. 1-10, 2008.

[11] I. Branovic, R. Giorgi, and E. Martinelli, "WebMIPS: A new web-based MIPS simulation environment for computer architecture education", in Proc. of 2004 Workshop on Computer Architecture Education (WCAE'2004) with the 31st International Symposium on Computer Architecture, Munich, Germany, 2004.

[12] M. Brorsson, "MipsIt - A simulation and development environment using animation for computer architecture education", in Proc. of 2002 Workshop on Computer Architecture Education (WCAE'2002) with the, 29th International Symposium on Computer Architecture, Anchorage AK, USA, 2002.

[13] K. Vollmar, and P. Sanderson, "A MIPS assembly language simulator designed for education". The Journal of Computing Sciences in Colleges, vol. 21, no. 1, 2005.

[14] D.A. Patterson, and J.L. Hennessy, "Computer organization and design MIPS edition: The hardware software interface", 5th ed., Morgan Kaufmann, 2013.

Evaluación basada en Proyectos en una asignatura troncal de Sistemas Electrónicos

M. Perales Esteve, E. López Morillo, F. Muñoz Chavero, F. Barrero García, S. Toral Marín
Departamento de Ingeniería Electrónica.
Escuela Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla
mperales@us.es

Abstract— **Con la aparición de los nuevos planes de estudio, y la creación de titulaciones novedosas, se generó un interés creciente por métodos de evaluación alternativos, centrados en valorar la adquisición de una serie de competencias más que en la capacidad de memorización, como puede ser la Evaluación basada en proyectos. El problema de este tipo de evaluación aparece cuando crece el número de alumnos. Se presenta la experiencia que se tiene en una asignatura troncal que ha pasado de 20 a más de70 alumnos, qué problemas se han planteado y cómo se han ido solucionando.**

Keywords— **PBL, teaching process, Digital systems.**

I. INTRODUCCIÓN

El aprendizaje y la evaluación basada en proyectos tiene un especial sentido en el contexto de la ingeniería [1]. Desde el punto de vista de la formación, se les exige una mayor destreza en una serie de competencias globales, no tanto en cuestiones particulares de la materia. Desde el punto de vista del alumnado, resulta normalmente mucho más motivante la realización de un proyecto, aunque sea desde un punto de vista meramente académico, que el estudio de una materia para un examen [2]. El problema suele aparecer cuando la asignatura crece de tamaño. A pesar de las buenas intenciones a la hora de redactar los nuevos planes de estudio, lo cierto es que al cabo de poco tiempo volvemos a tener grupos de 80 alumnos por clase, lo que dificulta bastante la realización de este tipo de labores docentes.

En concreto, en la asignatura Sistemas Electrónicos, de tercer curso de los estudios de Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica, se pasó de 21 alumnos el primer curso a 50 en el segundo año, y un total de 74 en el curso presente. Este incremento se ha producido a coste cero, en el sentido de que no se ha realizado ningún desdoble de grupos, por lo que toda la docencia teórica sigue recayendo en los mismos profesores. Es evidente que el grado de dedicación a la dirección o tutorización de los trabajos de los alumnos es decreciente. Por lo tanto, hay que intentar mejorar la autonomía de los alumnos en el proceso de aprendizaje y en el desarrollo de sus proyectos, para hacer viable el método docente y de evaluación basado en proyectos.

En este trabajo se expondrá el caso de esta asignatura, para lo que se empezará mostrando la organización docente de la misma, comentando sus bloques y la docencia impartida, para mostrar a continuación los sistemas de evaluación usados para las diferentes partes. Se hará posteriormente un análisis de los diferentes problemas que se encuentran y cómo se han ido dando soluciones a los mismos, haciendo una lectura crítica de estas soluciones. Finalmente, se tratará de sacar alguna conclusión a futuro ante el previsible crecimiento que todavía puede experimentar la asignatura.

II. CONTEXTO DOCENTE

Sistemas Electrónicos es una asignatura obligatoria de tercer curso del Grado de Ingeniería en Electrónica, Robótica y Mecatrónica, que se imparte en la Escuela Técnica Superior de Ingenierías de Sevilla y en la Universidad de Málaga, de manera coordinada, dentro del marco del Campus de Excelencia Internacional Andalucía Tech. Esta titulación oferta un total de 65 plazas (un grupo) en primer curso, siendo impartida desde el curso 2011-12, por lo que la asignatura en cuestión se lleva impartiendo desde el curso 2013-14. En la Tabla I se muestran las cifras de matriculación y aprobados (en porcentaje sobre matriculados). Es fácil comprobar el incremento constante de alumnos en la asignatura. Dado que el número de alumnos que entran en primer curso es fijo, el incremento de alumnos en la asignatura se puede deber al efecto *tapón* que generan algunas asignaturas básicas de electrónica. Así, por ejemplo, la asignatura Electrónica General (de segundo curso) ha ido creciendo de 41 alumnos a 123, con un índice del 53% de repetidores. Es previsible por tanto que el número de alumnos en la asignatura en estudio crezca todavía un poco más, hasta situarse en torno a 80-90 alumnos por curso.

Con estas cifras parece necesario realizar esta reflexión sobre los métodos de evaluación, y sobre si realmente es viable seguir evaluando exclusivamente con proyectos o si será necesario recurrir a otro tipo de sistemas más tradicionales de evaluación.

TABLE I. CIFRAS DE MATRICULACIÓN Y APROBADOS

	Año académico				
	13-14	***14-15***	***15-16***	***16-17***	***17-18***
Matriculados	22	52	51	60	74
Aprobados (%)	77	82	90	88	97

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

III. Organización de la asignatura

La asignatura se organiza verticalmente en dos partes totalmente diferenciadas, y horizontalmente se articula en clases de teoría y prácticas. Ambas divisiones son al 50%. Respecto a la división *vertical*, esto es, a lo largo del cuatrimestre, las 7 primeras semanas se dedican a estudiar los sistemas basados en lógica programable, centrándose en el uso de una FPGA de Xilinx como herramienta del curso. La segunda parte del curso, hasta final del cuatrimestre, se dedica al estudio de sistemas basados en microprocesador, y más concretamente en el diseño de sistemas basados en microcontroladores. Como herramienta básica se utiliza un microcontrolador de Texas Instruments y su sistema de desarrollo nativo.

La división de la asignatura en dos mitades estancas lleva, de forma natural, a que la evaluación se haga también basada en dos notas separadas. Desde el inicio de esta materia se ha apostado por la evaluación basada en proyectos, lo que se traduce en que los alumnos deberán realizar dos proyectos bien distintos: uno basado en la FPGA estudiada en la primera parte, y otro basado en el microcontrolador de la segunda.

Por otro lado, el hecho de disponer de un 50% de créditos prácticos posibilida de alguna forma que la docencia sea mucho más cercana a la práctica, y en formatos más reducidos. Esto es debido a la existencia de un único grupo de teoría por cuatro grupos de prácticas. Así, en ambas partes de la asignatura, la explicación de una serie de conceptos más específicos (como puede ser alguna peculiaridad del lenguaje VHDL o la configuración de algún periférico especial del microcontrolador) se realiza en las clases de laboratorio, teniendo los alumnos disponibles los equipos para probar, sobre la marcha, los conceptos adquiridos.

IV. Evaluación basada en proyectos

A pesar del incremento experimentado en la asignatura, la evaluación de la misma se sigue realizando fundamentalmente basada en proyectos. De manera general, aunque cada parte de la asignatura evalúa de forma ligeramente distinta, los alumnos deberán hacer un trabajo de diseño completo de un sistema, que servirá para acreditar la adquisición de las competencias que se pretenden desarrollar en la asignatura. Se detallan a continuación los métodos de evaluación seguidos en cada una de las dos partes de la asignatura.

A. Sistemas programables

En la primera parte de la asignatura se estudia el diseño e implementación de sistemas digitales mediante circuitos lógicos programables. Aunque en la parte teórica, concretamente en el tema dedicado a las tecnologías de fabricación, se da una visión general todos los dispositivos lógicos programables existentes detallando su arquitectura hardware, la parte práctica de la asignatura se centra en diseño digital en FPGAs.

El sistema hardware sobre el que se desarrollan las sesiones prácticas y el proyecto de curso es la placa de desarrollo Basys 2 de Digilent [3]. En la figura 1 se muestra una fotografía de la placa de desarrollo empleada que cuenta con los siguientes recursos hardware:

- FPGA Spartan 3E de Xilinx con 100.000 puertas.
- Controlador USB Atmel AT90USB2 para la transferencia de datos y programación, además de poderse usar como conector de alimentación.
- Flash ROM Xilinx Platform para el almacenamiento de la configuración de la FPGA.
- 8 diodos LED, display de 7 segmentos de 4 dígitos, 4 botoneras y 8 interruptores.
- Conectores PS/2 y VGA de 8 bits.
- Reloj configurable por el usuario (25/50/100MHz) y zócalo para alojamiento de un reloj secundario.
- 4 conectores de expansión Pmod de 6 pines.
- Protección ESD en todas los puertos I/O.

Las clases teóricas están destinadas fundamentalmente a la exposición del lenguaje de descripción hardware VHDL y el flujo de diseño para síntesis de sistemas digitales en dispositivos lógicos programables. En cuanto el alumno adquiere una base conceptual suficiente, de forma entrelazada con las sesiones de teoría se van desarrollando tres sesiones prácticas evaluadas previas a la realización del proyecto de curso. Estas prácticas pueden catalogarse como "fase de entrenamiento" y consisten en el diseño de distintos bloques relativamente sencillos y su implementación en la placa de desarrollo que se utilizará en la "fase de desarrollo" del proyecto. Los objetivos generales de estas sesiones prácticas son los siguientes:

- Afianzar los conceptos del lenguaje VHDL expuestos en las clases teóricas.
- Familiarizarse con el flujo de diseño real en FPGA mediante el uso de la herramienta software (ISE Design Suite de Xilinx) que tendrán que usar para desarrollar el proyecto de curso.

Durante estas tres primeras prácticas los estudiantes diseñarán además una serie de bloques que podrán reutilizar en el proyecto de curso tras cierto grado de rediseño. Concretamente, contadores, decodificadores y bloques lógicos (primera

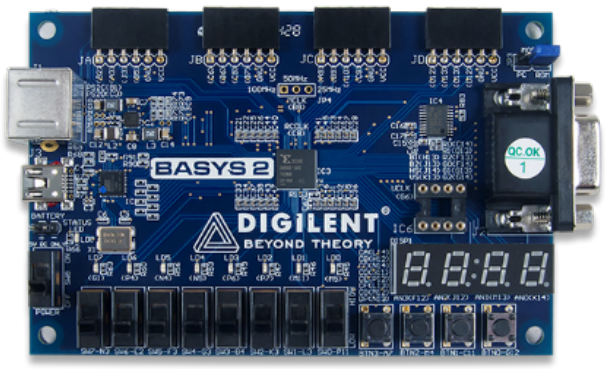


Fig. 1. Placa de desarrollo Basys 2 de Digilent utilizada en el bloque de diseño con circuitos lógicos programables de la asignatura.

práctica), control de un monitor VGA (segunda práctica) y diseño de un sistema de transmisión rs-232 (tercera práctica Esta serie de tres prácticas que conforman la "fase de entrenamiento" suponen el 20% de la nota final en este bloque de la asignatura. Para evaluarlas se contemplan dos tipos de entrega:

- La versión básica, en la que el alumno presenta un bloque digital funcional que opera tal y como se especifica en el enunciado de la práctica y que se calificaría con 6 puntos sobre 10.
- Para conseguir la máxima nota el estudiante tiene que presentar una versión mejorada, que debe incluir alguna característica adicional que implique un paso más en cuanto a su preparación de cara al proyecto de curso. Como referencia se les proporciona diversos ejemplos del tipo de mejoras que suponen la máxima nota. Por ejemplo, hacer que la cuenta sea reversible al cambiar la posición de un interruptor de la placa en la practica 1 o conseguir movimiento a velocidad constante en los objetos representados en el monitor en la practica 2.

La evaluación de las 3 prácticas de entrenamiento se realiza en una misma sesión de prácticas que tiene lugar justo antes de comenzar a desarrollar el proyecto de curso. En esta sesión cada alumno se acerca al puesto del profesor, programa la placa de desarrollo y realiza una demostración del funcionamiento de cada uno de los bloques digitales diseñados.

Desde la clase de presentación de este bloque de la asignatura los alumnos saben que una parte importante de su evaluación se realizará mediante el desarrollo de un proyecto que tendrán que comenzar tras la finalización de las 3 sesiones de prácticas evaluadas. La calificación obtenida en el proyecto de curso supone un 80% de la nota final en este bloque de la asignatura. La temática del proyecto así como sus especificaciones básicas es común para todos los estudiantes a fin de conseguir la homogeneidad necesaria que haga factible la evaluación de un número tan elevado de alumnos. La temática propuesta desde el arranque de la asignatura en el curso 2013-14 es el desarrollo de un videojuego hardware. El objetivo es reproducir el funcionamiento de un videojuego conocido, aunque personalizado en cuanto a cambios en la mecánica de juego y la estética. La experiencia nos ha demostrado que esta temática motiva especialmente al alumnado al poder comprobar sus progresos de una forma 100% visual y además tiene la ventaja de que solo es necesario un monitor y una placa de desarrollo para su realización.

El trabajo se realiza en grupos de tres alumnos. Tras una sesión teórica de orientación para la realización del proyecto, los alumnos deben presentar un anteproyecto en el que se les anima a definir de forma precisa el número de bloques a desarrollar y la interfaz de cada uno de ellos, con el objetivo de poder realizar una división efectiva del trabajo siguiendo una metodología top-to-down.

Para la realización del trabajo los alumnos disponen de un sistema de préstamo de placas de desarrollo implementado a través de la biblioteca de la ETSI. Con este sistema se garantiza el acceso al material necesario a todos los alumnos durante un tiempo razonable (24 horas máximo) evitando su monopolización.

Para la evaluación del proyecto de curso los alumnos deben entregar antes de una fecha previamente acordada una memoria descriptiva del sistema digital que han diseñado y la librería resultante del proyecto en ISE Design Suite que incluya todos los ficheros con código VHDL correspondientes a los bloques diseñados y los test-benches de las simulaciones realizadas, además del .bit del sistema definitivo. Esta entrega se realiza a través de la plataforma de enseñanza virtual de la Universidad de Sevilla. Tras la entrega del proyecto los estudiantes realizan una presentación pública del mismo que incluye una demostración del juego diseñado. La calificación del proyecto se realiza mediante la valoración independiente de cuatro categorías:

- Resultados. Se valora el grado de complejidad alcanzado, relativo a las mejoras o variantes introducidas en el videojuego respecto al funcionamiento básico definido por especificaciones. En este apartado se valora el uso de elementos de la placa de desarrollo para controlar diferentes modos del juego, el uso extensivo y eficiente de memorias de bloque para enriquecer gráficamente el juego y la introducción de cambios relacionados con la dinámica del juego como diferentes grados de dificultad, aleatoriedad en la aparición de eventos o un registro histórico de puntuación.
- Código. En este apartado se valora que los alumnos hayan seguido algunas pautas de buenas prácticas para la síntesis de circuitos descritos en VHDL expuestas en las clases de teoría. Principalmente la realización de las máquinas de estado mediante una descripción basada en dos procesos síncrono y combinacional.
- Memoria. Entre otros aspectos generales como una estructura adecuada y calidad de redacción, se valora que incluya un análisis de los warnings aparecidos durante el proceso de síntesis y un análisis de la cantidad de recursos de la FPGA empleados.
- Presentación. Se valora la capacidad de los alumnos de defender el trabajo hecho. Esta presentación sirve también para detectar si el trabajo ha sido realizado efectivamente por todo el grupo o sólo por parte de él, pudiendo concederse notas distintas a los miembros del grupo.

El videojuego propuesto para el proyecto de curso del presente año académico ha sido Flappy Bird. En la figura 2 se muestra uno de los proyectos presentados. En total se han presentado 26 proyectos que han sido realizados por 70 alumnos (el 96% de los matriculados) y la nota media obtenida ha sido de 7.6 puntos sobre 10.

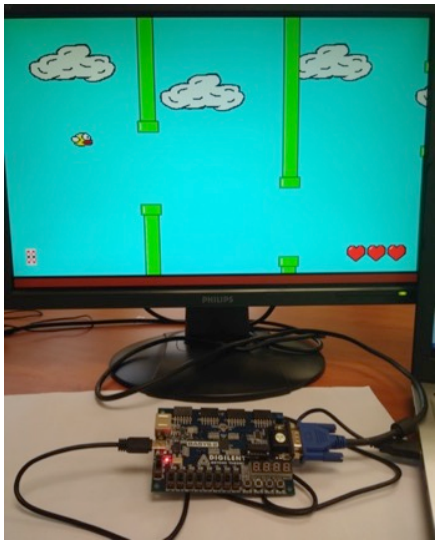


Fig. 2. Uno de los proyectos presentados durante el curso 2017-18.

B. *Sistemas microprocesados*

En la segunda parte de la asignatura se estudian sistemas basados en microprocesador, particularizando para sistemas basados en microcontroladores por simplicidad y por el interés específico para áreas de automática y robótica. El sistema base que se utiliza para las prácticas, y sobre el que gira también la docencia teórica es el Launchpad MSP-EXP430G2, de Texas Instruments [4]. Este sistema es de muy bajo coste (menos de 10€ por sistema de desarrollo), y se dispone de gran cantidad de ellos por ser de uso en otros cursos. A lo largo de las clases de teoría se estudia el funcionamiento del microcontrolador, su programación, y el uso de los periféricos internos que posee:

- 16 pines de E/S con interrupciones
- 2 Timers de 16 bits con comparadores y modos de manejo como pwm, entre otros
- Convertidor A/D de 10 bits y 8 canales
- Puertos serie SPI, I2C, UART
- Módulo Watchdog
- Flash interna programable con una zona para guardar datos o parámetros de interés.

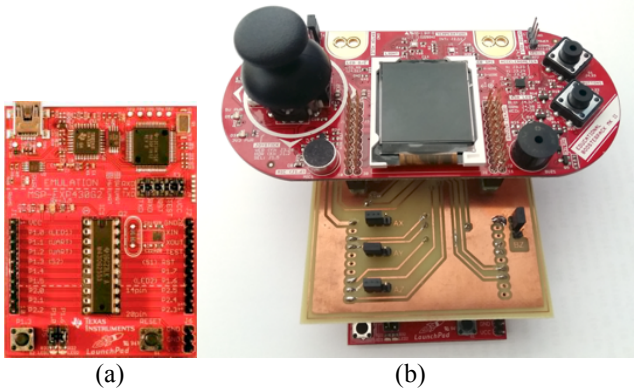
Por otro lado, en paralelo se desarrollan las sesiones prácticas en las que se utilizan los conocimientos adquiridos, manejando para ello un sistema (Educational BoosterPack MKII) [5] que, aunque originariamente no está diseñado para este microcontrolador, se ha adaptado para su uso con una placa intermedia de adaptación. Usando esta placa, los alumnos tienen a su disposición los siguientes periféricos externos:

- dos botones
- un led tricolor
- un joystick analógico de dos ejes
- un micrófono con circuito de adaptación
- un acelerómetro de 3 ejes con salidas analógicas
- un pequeño buzzer
- una pantalla lcd en color de 128x128 conectada por puerto spi
- sensores de luminosidad y de temperatura, conectados al bus i2c
- un conector para un servo pequeño

Desde el comienzo de la asignatura, a los alumnos se les informa que deberán hacer un trabajo, por grupos (de un máximo de 2 personas), para que vayan pensando desde el principio en dicho trabajo. A medida que van viendo en clase los diferentes periféricos internos y externos pueden ir variando la idea inicial que tenían del trabajo. Al ser alumnos de una titulación con un interés especial en la robótica, normalmente eligen trabajos relacionados con este campo, ya sean pequeños robots móviles o brazos articulados. Es necesario insistir en que una mayor complejidad mecánica no se evalúa y que se deben centar en el diseño electrónico y la implementación en el microcontrolador.

Una vez que acaban las clases regladas de la asignatura, se les da un tiempo a los alumnos para que desarrollen el trabajo. Para intentar homogeneizar dichos trabajos y evitar una disparidad que puede dificultar la evaluación objetiva, se les insiste en que sería recomendable usar el hardware adicional usado en las prácticas. De hecho, se les ofrece la posibilidad de llevarse en préstamo un sistema completo (microcontrolador, placa de conexión y Boosterpack) durante las semanas que tienen para desarrollar el trabajo. Igualmente, se les proporcionan a los que lo solicitan otros elementos adicionales como interfaces Bluetooth, pantallas en modo texto, servos, pequeños motores de continua, etc. Con todos estos elementos es sencillo acometer el diseño de una serie de proyectos, como pueden ser entre otros:

- Juegos gráficos en la pantalla
- Sistemas de seguridad basados en los sensores



(a) (b)

Fig. 3. Sistema empleado en las prácticas y trabajos de la asignatura. (a) Microcontrolador; (b) Sistema completo Launchpad+Boosterpack+ placa de interconexión

- Interfaces de control de sistemas complejos
- Sistemas de control inalámbricos basados en Bluetooth
- Pequeñas implementaciones de controles automáticos de luz y temperatura (domótica)

Un cierto número de alumnos opta por montar sus propios sistemas. Por otro lado, se les valora también si hacen algún montaje propio, desarrollando placas de circuito impreso con, por ejemplo, drivers para motores de continua, sensores de distancia o de condiciones ambientales (humedad, presión, temperatura) o cualquier otro elemento.

Finalmente, los alumnos deben entregar en un plazo fijado una memoria del trabajo realizado, así como los archivos de programas y documentación adicional necesaria, haciendo uso para ello de la plataforma de Enseñanza Virtual que la Universidad dispone. Tras la entrega del proyecto, se procede a la defensa del mismo de manera pública. Al ser tantos alumnos se les limita el tiempo de la exposición a 5 minutos por grupo, incluyendo el montaje de los equipos, la presentación propiamente dicha del trabajo y la demostración en directo, si la hacen.

La evaluación de la asignatura, en esta parte de la misma, se compone de una nota de prácticas, asignada a lo realizado en el laboratorio durante las sesiones prácticas, y una nota de *teoría*, que en realidad será la nota del trabajo. A su vez, la nota del trabajo se divide en tres epígrafes que se evalúan independientemente:

- El proyecto. Se tiene en cuenta la adecuación del proyecto al sistema usado (microcontrolador de capacidad reducida), así como el aprovechamiento que se hace de sus recursos internos (memoria y periféricos). También se procura
- La documentación presentada. Se valora la claridad de la redacción, así como que el proyecto quede completamente especificado. Es importante que los alumnos aprendan a redactar proyectos, y por tanto se valora bastante esta parte. También se tiene en cuenta que se hayan aportado otros materiales (videos, fotografías o cualquier materia adicional) que puedan ayudar a valorar el trabajo
- La presentación. Se evalúa que la presentación que hagan de su proyecto aborde los aspectos claves del mismo, que sea amena, así como el uso que hagan de los elementos multimedia disponibles. Puntúa realizar la demostración del sistema en directo, por el riesgo que conlleva, o en todo caso mostrar un video del sistema funcionando.

Este curso en total se han presentado 37 trabajos. La defensa de los mismos llevó aproximadamente 4 horas, en las que los alumnos asistieron a todas las presentaciones, pudiendo preguntar en caso de necesitar aclaraciones. Aunque todavía no se ha cerrado la calificación de los mismos, el nivel encontrado en general es bastante bueno, comparable con el de otros cursos. Algunos trabajos interesantes presentados han sido:

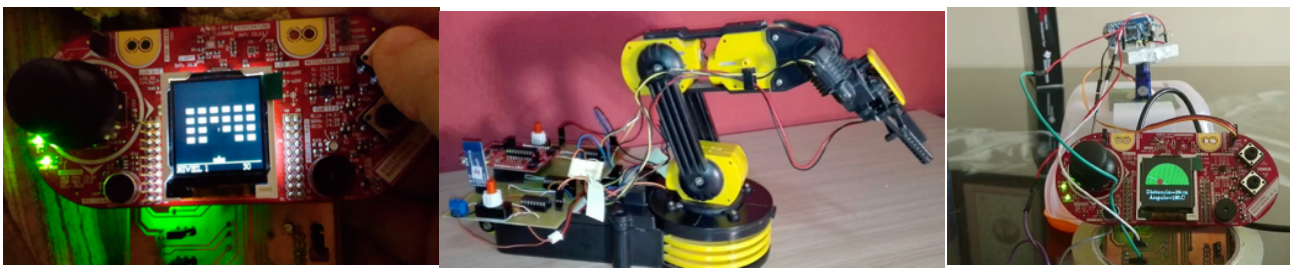
- Juego Space Invaders. Usando la pantalla del sistema y los recursos del microcontrolador (16k de flash y 512 bytes de ram) se ha implementado el juego con diferentes fases, música, y almacenamiento permanente de la puntuación máxima.
- Control de brazo robótico con 5 grados de libertad. Han usado un brazo robótico de juguete al que le han implementado un nuevo control. Todo el sistema se monitoriza y se controla desde un móvil Android a través de Bluetooth, desarrollando una aplicación en Android para ello.
- Detección de obstáculos. Se ha implementado un sistema que funciona como un radar, haciendo un barrido angular y representando en la pantalla los obstáculos encontrados, dando su posición angular y distancia. Se detectan los obstáculos usando ultrasonidos.

V. Problemas encontrados y soluciones propuestas

A lo largo del desarrollo de esta asignatura, nos hemos ido encontrando con diferentes problemas, debidos en su mayoría al incremento del número de alumnos. Se enumeran a continuación algunos de ellos, así como las soluciones ensayadas.

A. Docencia en el aula.

Los primeros cursos, dado el reducido número de alumnos en el aula, se realizaban ejemplos de funcionamiento de los diferentes periféricos en el aula. Los alumnos disponían de equipos para seguir la explicación y reproducían el ejemplo a la vez, viendo el funcionamiento de cada uno de los periféricos internos del microcontrolador. Esto se hizo inviable a partir del tercer año, pasando a realizar los ejemplos exclusivamente el profesor. En cualquier caso, se intenta que las sesiones prácticas coincidan en el tiempo con las explicaciones teóricas, para que la aplicación de lo visto en clase sea lo más inmediata



(a) (b) (c)

Fig. 4. Trabajos presentados en la parte de microcontroladores. (a) Juego Space Invaders; (b) Control brazo robótico; (c) Detección de obstáculos por ultrasonidos

posible.

B. Tutorización de trabajos

Al ser un número creciente de alumnos, sin que ello conlleve un incremento de la dotación de profesorado, se hace cada vez más difícil realizar una tutorización real de los trabajos. Se han realizado las siguientes acciones para tratar de mitigar el problema:

- Trabajos en grupo. Al hacer grupos de trabajo de 2 ó 3 personas, se disminuye bastante el número de trabajos a tutorizar y corregir. Sin embargo, también se dificulta mucho la evaluación individualizada de los conocimientos, al no saber exactamente qué parte del trabajo ha desarrollado cada miembro del equipo.
- Homogeneizar los enunciados. En la parte de fpga, se ha optado por realizar un enunciado fijo para los trabajos, lo que facilita el seguimiento y la evaluación de los trabajos, al ser más similares tanto los problemas como las soluciones encontradas
- Concentrar horarios de tutoría. Dado que los alumnos no suelen acudir a tutoría durante el curso, se duplicaron los horarios de tutoría durante las semanas en las que estaban desarrollando el trabajo de microcontroladores, de manera que pudieran ser atendidos todos.

C. Realización de trabajos

En los primeros cursos, dada la falta de material disponible y el número de alumnos, éstos hacían los trabajos en los laboratorios del departamento, turnándose los equipos a utilizar. Al aumentar el número de alumnos se hace inviable este modo de operación, para lo que se ha realizado un acopio de material extra para poder prestar a los alumnos todo el material necesario para el desarrollo del trabajo. De esta manera, los grupos de trabajo retiran el material (con control de fecha, por si fuese necesario hacer circular algunos equipos más escasos), pudiendo trabajar en su domicilio o en cualquier sala de estudio de la escuela.

D. Corrección de trabajos

Un problema adicional asociado al número de trabajos es la dificultad de corregir esa cantidad de trabajos, sobre todo si son muy diferentes entre sí. Para tratar de mitigar el problema, se ha procurado disminuir en lo posible esta dispersión. Viendo los trabajos presentados este curso, un 40% de ellos han usado únicamente el hardware prestado para ello (Boosterpack), lo que facilita una corrección homogénea.

VI. CONCLUSIONES

Año tras año, el número de alumnos en la asignatura se incrementa dificultando la realización de una evaluación basada fundamentalmente en trabajos. Sin embargo, aunque esto supone un sobreesfuerzo para el profesorado de la asignatura, hay indicadores que señalan que el método es correcto:

- Los resultados de las encuestas oficiales, que la Universidad realiza a los alumnos al finalizar el curso, siempre han sido positivos, mostrando una gran aceptación de los alumnos.
- El perfil o la orientación de los alumnos de esta titulación, específicamente, aconseja un método de enseñanza basado en *aprender haciendo* más que en la adquisición de contenidos en memoria. Son alumnos muy vocacionados al diseño, montaje y prueba de proyectos de electrónica y materias afines.
- Los resultados académicos son muy buenos, con un índice de aprobados que roza siempre el 100%. Esto es normal en las asignaturas que evalúan basándose en proyectos, en parte por el hecho de que los trabajos sean en grupo: los alumnos que presentan a priori más dificultades o tienen menos capacidad (o realizan menos esfuerzo) ven suplidas sus carencias normalmente por el compañero o compañeros del grupo. Esta es, probablemente, la mayor debilidad del procedimiento de evaluación, aunque se estima que el número de *falsos positivos* (alumnos que aprueban sin haber adquirido unos conocimientos suficientes) es menor que con una prueba escrita.
- La formación adquirida por los alumnos en la asignatura es buena, como se comprueba en los que al año siguiente cursan la asignatura de cuarto curso (Sistemas Electrónicos para la Automatización). El comentario de los profesores de esta otra asignatura es favorable, en cuanto a que los alumnos vienen suficientemente preparados para afrontar el siguiente escalón en los procesos de diseño.

Por todo ello, la valoración que hacemos de la docencia y la evaluación de la asignatura es positiva. Esto nos lleva a que, mientras sea posible, seguiremos usando este método docente y de evaluación, basado en la realización de trabajos.

REFERENCIAS

[1] S. Gwen, “Project-based learning: a primer” Technology and Learning, vol. 23, no 6, pp 20-30, 2003

[2] L. R. Mustoe and A. C. Croft, “Motivating engineering students by using modern case studies”, European J. Eng. Educ., vol. 15, no 6, pp.469-476, 1999..

[3] Digilent , “Basys 2 FPGA Board Reference Manual”, revised April 8, 2016

[4] http://www.ti.com/tool/MSP-EXP430G2

[5] http://www.ti.com/tool/boostxl-edumkii

Aprendizaje basado en Proyectos en una Asignatura de Electrónica Industrial

F. Barrero, A. Ruiz, I. González-Prieto, C. Martín, F. Gañán, M. Perales
Departamento de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Camino de los descubrimientos s/n, 41092 Sevilla
mperales@us.es

***Abstract*—La mejora reciente del binomio enseñanza-aprendizaje se caracteriza, entre otros, por la búsqueda de procedimientos alternativos que optimicen la capacitación adquirida por los alumnos y su evaluación. Uno de los procedimientos referenciados que ha recibido mayor interés en los últimos tiempos en relación a la enseñanza de la Ingeniería es la realización de proyectos colaborativos. Se buscan métodos de evaluación que se centren tanto en el proceso como en el resultado del aprendizaje, y la cooperación entre los alumnos en la realización de un proyecto realista relacionado con la asignatura cursada representa una opción muy interesante y plausible. En este trabajo se muestra el procedimiento de aprendizaje cooperativo diseñado como metodología docente y de evaluación en una asignatura optativa de 4º curso en el grado de Ingeniería de las Tecnologías Industriales (especialidad de Electrónica Industrial) impartido en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. Se describe la experiencia, que se basa en la comprensión y rediseño de un sistema real, y se muestra un ejemplo de trabajo desarrollado por dos alumnos, consistente en la implementación del sistema de control de una impresora 3D.**

Keywords—PBL, teaching process.

I. INTRODUCCIÓN

La enseñanza en el entorno universitario continúa basándose en el mismo paradigma docente que ha imperado durante siglos, centrado en la programación de la transmisión de contenidos [1]. Las características fundamentales que definen este paradigma son: el docente planifica al detalle todo lo que va a ocurrir en clase y plantea las tareas que hará el alumno en casa. Si el docente no puede hacer lo que tenía planificado para sus clases, el programa del curso y los resultados académicos se resienten, aunque el hecho de que el alumnado no haga sus tareas no afecta al desarrollo del programa. Desde hace tiempo se conoce que este paradigma no es eficaz y se sabe que es necesario planificar una migración hacia otras estrategias educativas que eviten que el alumnado se convierta en un receptor pasivo de información [2].

La realidad es que muchas de estas nuevas estrategias educativas se han quedado en la teoría y todavía no se han aplicado de manera general debido, fundamentalmente, a la "inercia" que hace que los sistemas educativos sigan aferrados al paradigma tradicional. El nuevo paradigma educativo centrado en el alumnado debe crear las condiciones adecuadas para que éste se implique en su propio aprendizaje [3]. Existen diversas estrategias para lograr este objetivo tales como el aprendizaje basado en proyectos (*project based learning*, PBL) o el aprendizaje colaborativo [4], que es el uso de pequeños grupos de alumnos de manera que estos trabajen juntos para maximizar su propio aprendizaje y el de los demás. Los ambientes de aprendizaje acompañados de proyectos colaborativos como estrategia revierten en actividades de muy diferente índole y en la utilización de espacios diversos que hacen que las experiencias de los estudiantes no se centren en el aula de clase, ni siquiera en la vida misma de la institución universitaria. En definitiva, buscan el aprovechamiento del entorno cercano al alumno para el aprendizaje, fomentando la creación de una comunidad de aprendizaje donde se interactúa, se colabora, se respeta y se desarrolla el conocimiento.

En este trabajo se muestra cómo puede emplearse una estrategia de aprendizaje colaborativa en una asignatura de la especialidad de Electrónica Industrial de 4º curso en el Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales, impartido en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla. Por un lado, los objetivos docentes de la asignatura se centran en profundizar en competencias específicas del diseño de sistemas electrónicos digitales a partir de sistemas basados en el uso de un microprocesador. Por otro lado, se pretende avanzar en la idea de aplicación de PBL en el entorno lectivo mediante la introducción al alumno de dispositivos comerciales de interés como impresoras 3D, robots de aplicación industrial, juguetes electrónicos, drones o dispositivos similares que motiven al alumno y, en paralelo, potencien el desarrollo de competencias transversales inherentes a un grado de ingeniería en tecnologías industriales. En la propuesta que se presenta, el alumno debe en primer lugar analizar el sistema, para posteriormente afrontar un rediseño del mismo en base a un dispositivo microprocesador introducido en clase. Se trata de una propuesta ambiciosa por su complejidad, que no permite implementar en su totalidad el rediseño, habida cuenta el escaso número de créditos asignados. Para adecuar el trabajo y los objetivos docentes a los créditos asignados a la asignatura, se limitan los objetivos evaluables a la puesta en marcha del sistema microprocesador rediseñado, con el manejo de los periféricos más importantes relacionados con el control industrial (CAD, PWM y Timers), ofreciéndosele al alumno la posibilidad de continuar el trabajo hasta su conclusión durante el segundo cuatrimestre de cuarto curso, para la realización de

un Trabajo de Fin de Grado. Con la reforma de los planes de estudio y la creación de los programas de Grado y Máster, muchos alumnos encuentran serias dificultades para completar el Grado y finalizar sus Trabajos Fin de Grado a lo largo del cuarto curso de la titulación. La propuesta pretende asimismo iniciar a los alumnos en la realización del Trabajo Fin de Grado, favoreciendo su realización durante el curso.

En la siguiente sección se describe el contexto docente de la asignatura, centrada en el análisis y desarrollo de sistemas electrónicos basados en el procesador digital de señal (DSP) TMS320F28335 del fabricante Texas Instruments. Posteriormente se describe la experiencia desarrollada por dos alumnos de la asignatura durante el curso académico 2017-2018, consistente en el desarrollo del sistema electrónico de control de una impresora 3D. Finalmente se exponen las conclusiones obtenidas.

II. CONTEXTO DOCENTE

La experiencia docente que se presenta en este trabajo se refiere a la asignatura Electrónica Industrial, adscrita al cuarto curso de la titulación de Grado de Ingeniero en Tecnologías Industriales, e impartida durante el primer cuatrimestre en la Escuela Técnica Superior de Ingenierías de la Universidad de Sevilla. El plan de estudios y la descripción de la asignatura aparecen recogidos en las resoluciones de 20 de julio de 2011 y 15 de abril de 2015 de la Universidad de Sevilla, en las que se publica el plan de estudios de Graduado en Ingeniería de Tecnologías Industriales, BOE de 11 de Octubre de 2011, Núm. 245, y BOE de 19 de Mayo de 2015, Núm. 119, respectivamente. En ellas se establece que la asignatura es obligatoria para la especialidad de Electrónica Industrial, con 4.5 créditos asignados, de los cuales 3 corresponden a créditos teóricos y 1.5 a créditos prácticos o de laboratorio (2 horas de clases teóricas más 1 hora de clases prácticas a la semana durante el primer cuatrimestre lectivo).

Los objetivos docentes específicos se definen como "profundizar en el conocimiento del diseño sistemas electrónicos digitales a partir de sistemas basados en microprocesador, conocer periféricos y microprocesadores de aplicación industrial y aprender a manejarlos". Las competencias específicas a desarrollar son "conocimiento de los fundamentos y aplicaciones de la electrónica digital y microprocesadores" y "capacidad para diseñar sistemas electrónicos analógicos, digitales y de potencia". Se destacan otras muchas competencias transversales genéricas diversas, difícilmente alcanzables con un método de enseñanza tradicional o en base a experiencias PBL específicas que se diseñen para la asignatura. Este es el caso particular de las competencias genéricas, centradas en la concepción generalista de la titulación, y que incluyen en nuestro caso:

- La capacidad para la redacción, firma y desarrollo de proyectos en el ámbito de la ingeniería industrial que tengan por objeto, la construcción, reforma, reparación, conservación, demolición, fabricación, instalación, montaje o explotación de: estructuras, equipos mecánicos, instalaciones energéticas, instalaciones eléctricas y electrónicas, instalaciones y plantas industriales y procesos de fabricación y automatización.
- La capacidad para la dirección de las actividades objeto de los proyectos de ingeniería de estructuras, equipos mecánicos, instalaciones energéticas, instalaciones eléctricas y electrónicas, instalaciones y plantas industriales y procesos de fabricación y automatización.
- La capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la Ingeniería Industrial.
- La capacidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.
- El conocimiento, comprensión y capacidad para aplicar la legislación necesaria en el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial.

En nuestro caso, centramos la experiencia PBL en un sistema comercial para acercar la experiencia al alumno y añadir una concepción generalista acorde con la titulación, sin perder de vista los objetivos específicos perseguidos.

Los descriptores que definen la asignatura incluyen los sistemas lógicos programables, microprocesadores y periféricos, microcontroladores, procesadores digitales de señal, sistemas empotrados y codiseño hardware/software, siendo la metodología docente empleada la siguiente:

- Clases magistrales de teoría en pizarra con apoyo gráfico de transparencias, centradas en el diseño de sistemas electrónicos basado en microprocesador y en la arquitectura del DSP TMS320F28335, ver Figs. 1 y 2.
- Prácticas de laboratorio obligatorias para introducir al alumno en el manejo del entorno de programación Code Composer Studio, así como en la programación del DSP TMS320F28335 y sus periféricos, Fig. 3.
- Diseño de un sistema electrónico de aplicación industrial, basado en el DSP TMS320F28335, que incluye el montaje del mismo por parte de los alumnos.

Para entender la complejidad y volumen del trabajo desempeñado por los alumnos, nos centraremos en este documento a la descripción de uno de los proyectos que se han desarrollado durante el curso 2017-2018, desempeñado por dos alumnos y centrado en una impresora 3D comercial.

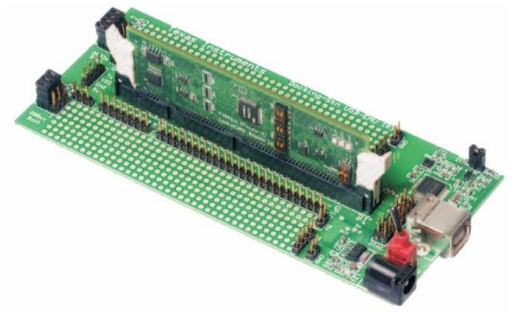


Figura 1. Plataforma "*delfino c2000 kit*", sistema de desarrollo para el DSP TMS320F28335 del fabricante Texas Instruments.

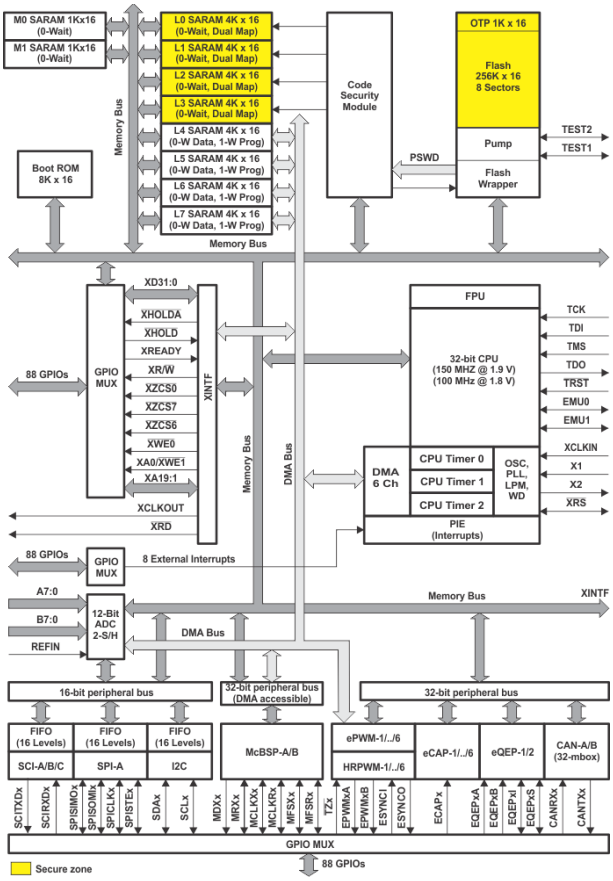


Figura 2. Arquitectura interna del DSP TMS320F28335 del fabricante Texas Instruments.

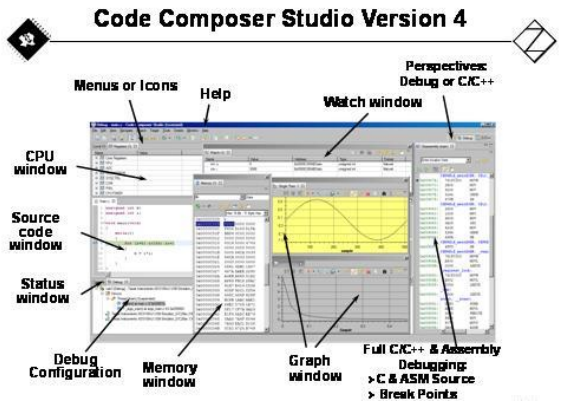


Figura 3. Entorno "*Code Composer Studio*" para el desarrollo y depuración de microprocesadores del fabricante Texas Instruments.

III. EJEMPLO DE EXPERIENCIA PBL

Durante el reciente curso 2017-2018, se realizaron tres trabajos en grupos de entre dos y tres alumnos. Desde el inicio se dejó libertad a los alumnos para que plantearan los mismos, con la supervisión del profesorado para limitar el alcance del trabajo a realizar, llegándose a los siguientes:

- Desarrollo del sistema de control de una impresora 3D.
- Desarrollo del sistema de control de un vehículo 4×4 controlado vía Bluetooth.
- Desarrollo de un sistema afinador de instrumento musical de cuerda.

En este artículo se describe el proyecto realizado por dos alumnos inscritos en la materia, consistente en el desarrollo del sistema de control de una impresora 3D. Para situarnos en contexto y comprender la concepción generalista que aporta, comentaremos brevemente la situación actual en el mundo de la impresión 3D.

A. Introducción a las impresoras 3D

La fabricación aditiva, como también se la conoce, presenta una nueva posibilidad de producción. Las piezas se fabrican por adición de material abriendo la puerta a la creación de piezas complejas en un solo bloque, sin necesidad de dividirlas en subpartes. Esta tecnología se puede usar desde el prototipado rápido hasta la producción industrial, teniendo como ventaja la posibilidad de producir infinitos diseños con un mismo aparato, sin necesidad de adaptar la máquina por un cambio del producto a fabricar. Obviamente existen ciertas desventajas asociadas al proceso de producción, como son la velocidad de producción, bastante lenta en la actualidad. También pueden surgir problemas con los derechos de autor, pues con un escáner 3D y la impresora podríamos replicar prácticamente cualquier pieza existente. Sin embargo, la impresión 3D puede ser considerada como uno de los pilares de la llamada industria 4.0, de la que muchos analistas se están haciendo eco en la actualidad, poniéndola en los cimientos de la cuarta revolución industrial. Así, se estima que una vez que esta tecnología alcance su máximo potencial, quedará al alcance de todos los seres humanos la fabricación de pequeñas piezas u objetos en casa, desapareciendo la necesidad de comprar el producto terminado, que quedaría reemplazada por la compra de la materia prima involucrada en el proceso de fabricación. Podríamos por ejemplo imprimir una cuchara, un abridor o casi cualquier cosa que se nos pueda ocurrir o que podamos necesitar.

En este caso, la impresora que se ha empleado utiliza la tecnología FFF, del inglés *fused filament fabrication*, que consiste en depositar capas de filamento fundido unas sobre otras, formando así una figura final en tres dimensiones. Para esto es necesario el uso de máquinas de control numérico que alcancen la precisión necesaria para la correcta impresión 3D. Existen en el mercado diferentes modelos y arquitecturas de impresoras 3D, si bien la más común hoy en día en cuanto a uso personal y doméstico es la Prusa i3 [5], es decir, la tercera iteración del modelo Prusa, Fig. 4.

Según su arquitectura, las impresoras 3D ofrecen distintas prestaciones, pero el trabajo se centró en el modelo mencionado anteriormente por ser el más utilizado y por disponer de una estructura para realizar el proyecto. Por otro lado, la arquitectura seleccionada goza de tanta popularidad por encontrarse bajo licencia GPL y ser de fácil montaje. Utiliza los tres ejes cartesianos X, Y y Z para definir el espacio a utilizar, siendo independientes los ejes X e Y, que trabajan simultáneamente, y solo funcionando el eje Z cuando se acaba una capa y es necesario cambiar altura para continuar la impresión.

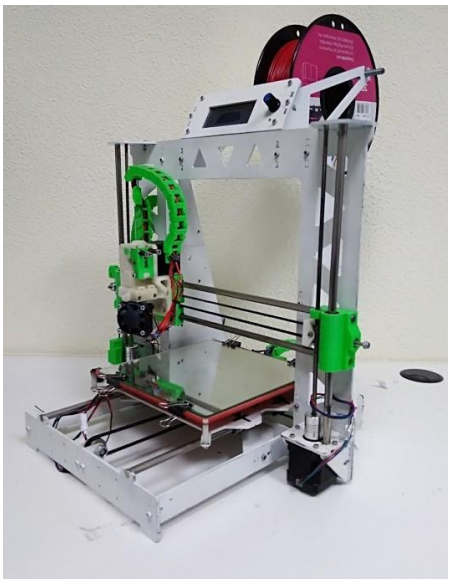


Figura 4. Impresora 3D empleada en el trabajo.

El movimiento RepRap también tiene mucho que ver no solo con el auge del modelo Prusa i3 sino con el desarrollo de las impresoras 3D domésticas a un coste asequible para el bolsillo de un ciudadano medio. Este movimiento promueve el desarrollo de las impresoras 3D de forma libre y sin licencias. El creador del modelo Prusa pertenece a esta comunidad, así como el creador del firmware Marlin que usan las impresoras. Son usuarios que no dudan en poner su trabajo a disposición del mundo para fomentar el uso de esta tecnología. El hecho de que sea libre permite a muchos fabricantes proporcionar kits de montaje o la impresora ya terminada al usuario final reduciendo de forma importante los costes en los que incurren. El movimiento RepRap aporta en su wiki las instrucciones de montaje necesarias para la construcción de una impresora 3D, tanto de la parte mecánica como electrónica, de forma que cualquier persona puede construir su propia máquina.

La relación de estas máquinas con la electrónica es indudable, su nombre ya nos da la primera pista: máquinas de control numérico o máquinas CNC. La máquina debe leer un código que define la pieza a fabricar (normalmente Gcode) y actuar según lo que indique. El código, en el caso de una impresora 3D convencional, no solo indica las posiciones a las que debe llegar el extrusor, sino la velocidad del éste o de movimiento, la aceleración, la temperatura de impresión, etc. Esto genera una necesidad de controlar la máquina según estas instrucciones, y debe ser de manera totalmente automatizada por lo que se requiere de un código previo que satisfaga todas las instrucciones posibles que puedan llegar a través del Gcode. En la mayoría de las impresoras 3D de uso doméstico este control lo realiza un Arduino, siguiendo un firmware de libre distribución llamado Marlin. La elección de Arduino tiene sentido pues tiene las prestaciones necesarias, un bajo coste y facilita la accesibilidad a personas no versadas en electrónica. El trabajo que se plantea consiste en sustituir el sistema de control basado en el sistema Arduino por el DSP TMS320F28335, de mucha más capacidad y que podría usarse como base para controlar varias impresoras en paralelo, lo que aumentaría el ritmo de producción de una pieza.

Los elementos de la impresora a controlar son varios: motores paso a paso, sensores de temperatura, ventiladores y sensores fin de carrera, así como una boquilla que se calienta, el denominado Hot End. También, se recomienda incluir una pantalla LCD que facilita de manera notable el uso del dispositivo, si bien no es estrictamente necesaria. Estos elementos combinados con las piezas mecánicas, como correas, permiten el movimiento de la impresora. Son necesarios, en resumidas cuentas, 5 motores paso a paso: uno para el eje X, otro para el eje Y, dos para el eje Z y un último motor que extruye el plástico al pasarlo por el Hot End. Los sensores fin de carrera son interruptores colocados tanto al final como al principio de los ejes, necesarios para la calibración inicial de la impresora aunque por software podrían eliminarse los que indican el final. Por último, con los sensores de temperatura y los ventiladores se debe controlar la temperatura de impresión para que se mantenga estable en el valor deseado.

La Fig. 5 resume, a título ilustrativo y por sencillez, el comportamiento de una impresora 3D convencional.



Figura 5. Diagrama de flujo básico sobre el funcionamiento general de una impresora.

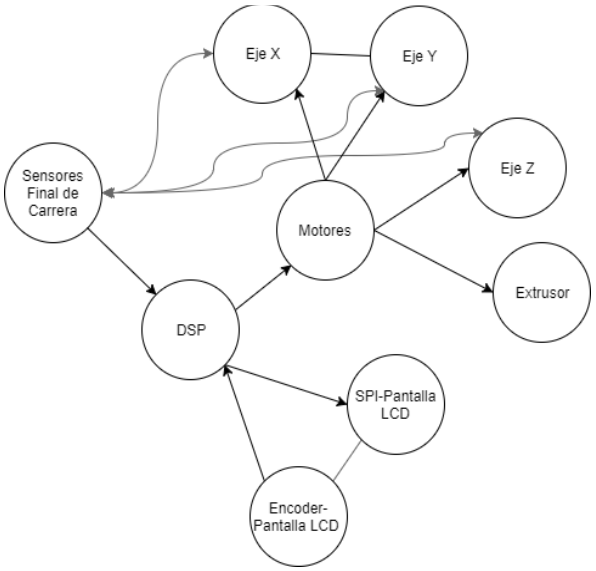


Figura 6. Organigrama básico de componentes en la experiencia PBL basada en la impresora 3D, desarrollada en el curso 2017-2018.

B. Experiencia PBL

En el proyecto realizado se desmontó toda la electrónica y se estudió toda la parte eléctrica, mecánica y sensorial de la impresora para localizar más fácilmente el hardware controlable, sustituyéndose el sistema Arduino por el DSP estudiado en clase, Fig. 6. Se identificó la información relevante para el funcionamiento de la impresora 3D, como por ejemplo la relativa al correcto manejo de los motores paso a paso, las conexiones de la pantalla LCD, etc. También se compró un kit de sensores fin de carrera para ampliar el número de sensores disponibles de 3 a 6, mejorando el sistema inicial al dotarle de medidas extra de seguridad y calibración en funcionamiento. Finalmente, el kit también incluye un PCB (*Printed Circuit Board*) con pantalla LCD, lector de tarjeta SD y un encoder, que se ha utilizado para ser fieles al diseño original del sistema comercial (este PCB es muy usado en los modelos de impresora 3D comerciales), aunque su uso complicaba el desarrollo del proyecto respecto a la situación de búsqueda de elementos de utilidad similar pero mayor simplicidad en su manejo.

El trabajo de rediseño se dividió finalmente en dos bloques en los que se centraron cada uno de los alumnos del grupo. El primero de estos bloques incluía la configuración general del DSP. Se estudió e implementó el conexionado con el PCB de la pantalla, se realizó la conexión y manejo del encoder y del periférico SPI que permite controlar la pantalla LCD, si bien aún no se ha puesto en funcionamiento por falta de tiempo. Los finales de carrera se añadieron al sistema como interrupciones hardware de tipo no enmascarables, debido a que deben de ser considerados como elementos de protección del sistema (es imprescindible que funcionen en este modo pues si la impresora siguiese ejecutando código de movimiento cuando llega al final de carrera, la máquina podría dañarse). El segundo bloque se centra en el movimiento de la impresora, simplificado en la actualidad al plano XY (el control del eje Z, que permitirá integrar la tridimensionalidad en las piezas impresas, se incluirá de forma análoga en el segundo cuatrimestre del curso). Para conseguir controlar el movimiento de los motores paso a paso se emplea el driver A4998 y una señal PWM generada por el DSP. El movimiento de los motores debe sincronizarse, para lo que se emplea una función específica. Se diseñó un algoritmo que mantuviera siempre una velocidad constante, pudiendo ésta cambiarse a voluntad. Así, los movimientos necesarios en los ejes X e Y se producen en la línea recta entre dos puntos y a la velocidad definida, lo que permite crear figuras complejas simplemente usando gran cantidad de puntos. En su estado actual, la impresora se desplazaba por el plano, si bien está previsto mejorar el código para controlar la velocidad y la aceleración y conseguir una mayor precisión en los desplazamientos.

Una vez que cada alumno completó su bloque de tareas, se procedió a unificar los trabajos realizados para desarrollar el algoritmo básico de manejo de la impresora, implementándose la función de inicialización del sistema con el establecimiento de la referencia inicial de impresión (coordenadas cero) y a la calibración de los sensores final de carrera para evitar daños en el equipo. Con la finalización del proyecto adscrito a la asignatura, se ha dado un primer paso en controlar el movimiento de la impresora 3D comercial, lo que se traducirá en un sistema comparable al inicial cuando se complete el desarrollo del software que traduzca el Gcode en instrucciones.

Sin entrar en detalle y a título informativo, los otros dos proyectos de la asignatura desarrollados por los alumnos han incluido el manejo de los motores de un vehículo 4×4 controlado vía Bluetooth desde una app y un afinador para instrumento musical de cuerda.

IV. RESULTADOS OBTENIDOS

Desde un punto de vista subjetivo, destacar el interés mostrado por los alumnos al realizar la asignatura, valorada en general muy positivamente por estos. Al tratarse de una asignatura con pocos alumnos matriculados (7 en el curso 2017-2018 y habitualmente menos de 10), el desarrollo de este tipo de experiencias se considera adecuado porque permite una evaluación y seguimiento del proceso de aprendizaje mucho más personalizado que la realización de un examen, si bien puede ser razonable complementar la evaluación de los trabajos con algún examen que permita modular de forma individual las calificaciones obtenidas.

De los 7 alumnos que han cursado la asignatura, sólo 4 estaban en disposición de completar el grado este curso, y de estos 4, dos continuarán el trabajo realizado hasta la finalización del mismo con la presentación de sus Trabajos Fin de Grado. Se espera que ambos puedan entregarlos antes del comienzo del Máster. Como comentario indicar que los otros dos alumnos ya tenían asignado el trabajo final de grado cuando comenzaron el curso.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se describe el contexto docente de una asignatura optativa de 4º curso en el grado de Ingeniería de las Tecnologías Industriales (especialidad de Electrónica Industrial) impartida en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla y denominada Electrónica Industrial. Al tratarse de la última asignatura que verán los alumnos de grado relacionada con el diseño

electrónico basado en microprocesador, se ha planteado un procedimiento de aprendizaje de tipo PBL, basado en la realización de un trabajo práctico cooperativo y en un producto comercial. Se ha presentado asimismo uno de los trabajos que han desarrollado los alumnos, consistente en la implementación del sistema de control de una impresora 3D basado en el DSP TMS320F28335. Dada la complejidad del proyecto, los objetivos evaluables se limitan a la puesta en marcha del prototipo, ofreciéndose al alumno la posibilidad de continuar el desarrollo durante el segundo cuatrimestre del curso como parte de su trabajo Fin de Grado. En general se puede deducir que la experiencia ha sido interesante para los alumnos, que continúan con los trabajos planteados si bien requiere de un importante esfuerzo por parte del profesorado para el correcto seguimiento de los proyectos.

REFERENCIAS

[1] Zabalza, Miguel A. (2002). La enseñanza universitaria: El escenario y sus protagonistas. Editorial Narcea. ISBN: 9788427713765.

[2] High Level Group on the Modernisation of Higher Education (2014). Report to the European Commission on New modes of learning and teaching in higher education. On-line (04/05/2018) accesible at http://ec.europa.eu/dgs/education_culture/repository/education/library/reports/modernisation-universities_en.pdf

[3] Gallardo, S., Barrero, F., Martínez-Torres, M.R., Toral, S.L., Durán, M.J. (2007), Addressing Learner Satisfaction Outcomes in Electronic Instrumentation and Measurement Laboratory Course Organization, IEEE Transactions on Education, Vol. 50, no. 2, pp. 129-136.

[4] Vélez de C., A. M. (1998), Aprendizaje basado en proyectos colaborativo en la educación superior, IV Congreso RIBIE, Brasilia.

[5] Wiki del proyecto RepRap sobre el modelo Prusa i3 y sus características: http://reprap.org/wiki/Prusa_i3

SESIÓN V.B: INNOVACIÓN EDUCATIVA

Salvar al soldado Teleco

Jaime Jiménez, Aitzol Zuloaga, Jesús Lázaro, Carlos Cuadrado y Unai Bidarte
Departamento de Tecnología Electrónica
Universidad del País Vasco (UPV/EHU)
Bilbao, España
Email: {jaime.jimenez, aitzol.zuloaga, jesus.lazaro, carlos.cuadrado, unai.bidarte}@ehu.es

***Abstract*—Desde hace algún tiempo, el número de estudiantes que ingresan en titulaciones relacionadas con las TIC, entre ellas, en Ingeniería de Telecomunicación, no permite cubrir la oferta laboral para esas profesiones. Las causas de que no se ocupen todas las plazas para estudiar ingenierías vinculadas a las TIC, a pesar de la excelente salida laboral, son muy diversas y complejas; algunas, incluso, desconocidas. Una penuria similar se observa en el número de egresados de esos grados –sustancialmente inferior al de ingresos– y en el de accesos a los másteres correspondientes –tampoco se matriculan todos los egresados, sino cada vez menos–. Ante estos desafíos, en la Escuela de Ingeniería de Bilbao, dentro de un programa de promoción más amplio, hemos apostado por una intervención en la que hemos depositado mucha esperanza: una asociación de estudiantes entusiastas de las TIC. De momento, nos ha permitido realizar unos talleres de robótica sencilla con alumnado de enseñanzas medias, dar un nuevo impulso a las jornadas de puertas abiertas e incorporar estudiantes "solventes" a nuestros trabajos fin de grado y de máster. Como colofón de esta iniciativa, enunciaremos las medidas y pasos que permitirían replicarla en otras escuelas o facultades.**

Keywords— Escasez de vocaciones tecnológicas; empleo en las Tecnologías de la Información y la Comunicación; promoción de las TIC en secundaria; experiencias académicas satisfactorias en la Universidad.

I. INTRODUCCIÓN

Desde hace algún tiempo –varía por universidades y comunidades autónomas; en el País Vasco, desde más o menos el curso 2004-05–, el número de estudiantes que ingresan en titulaciones relacionadas con las TIC, entre ellas, en Ingeniería de Telecomunicación, no permite cubrir la oferta laboral para esas profesiones –como muestra, en la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) no hay estudiantes suficientes para todas las ofertas de cooperación educativa que llegan–. Las causas de que no se ocupen todas las plazas para estudiar ingenierías vinculadas a las TIC –a modo de ejemplo, una vez más, en la UPV/EHU entran alrededor de 100 para una oferta de 120–, a pesar de la excelente salida laboral, son muy diversas y complejas: el público general no conoce ni entiende las tecnologías de telecomunicación; las TIC se han devaluado un tanto, precisamente al popularizarse; el alumnado está más "hechizado" con grados del ámbito de la educación o la medicina –probablemente por las condiciones laborales reales o imaginadas–; son carreras con fama de duras y, sin embargo, parece que menos polivalentes que otras ingenierías, como la industrial; los autores sospechamos que incluso existen otras causas que nos son insondables o incomprensibles. Una penuria similar se observa en el número de egresados de esos grados –sustancialmente inferior al de ingresos; en ocasiones puede rondar el 60 %– y en el de accesos a los másteres correspondientes –tampoco se matriculan todos los egresados, sino cada vez menos; en la UPV/EHU, en 2017-18, veinte matriculados–.

II. DESCRIPCIÓN DE LA INICIATIVA

Ante semejante desafío, de responder a una demanda laboral que no se satisface ya desde el número de ingresos a las carreras como la Ingeniería de telecomunicación, los Dptos. de tecnología electrónica y de ingeniería de comunicaciones de la UPV/EHU llevan tiempo realizando grandes esfuerzos y probando diversas medidas. Todos ellos conforman un plan integral encaminado a suscitar entre el alumnado de secundaria vocaciones científico-tecnológicas, en general, y a atraer estudiantes al Grado en ingeniería en tecnologías de telecomunicación, en particular. Entre tales acciones, si bien no podemos garantizar su eficacia tangible, la que sin duda ha generado mayores esperanzas ha sido alentar y afianzar una asociación de estudiantes entusiasmados con algunas tecnologías próximas a las TIC.

A. Pasos para crear una asociación de este tipo

Para nuestra fortuna, dicha agrupación, autodenominada "Bilbaodynamics" [1] (Fig. 1), ya existía cuando conocimos a sus miembros. Casualmente se dirigieron a un profesor de Electrónica, en busca de consejo a la hora de comprar una tarjeta-osciloscopio (USB), ante lo que el docente les ofreció un aparato completo, descatalogado por viejo, pero que funcionaba correctamente. De esto podemos deducir la primera línea de acción:

a) Crear espacios de comunicación con el alumnado –ser amable, escucharles–, de modo que se atrevan a preguntarnos y pedirnos ayuda en cuestiones que transcienden lo estrictamente académico. Así podremos descubrir estudiantes con inclinación a la Electrónica, o fomentar su afición hacia la misma.

Una vez identificados los primeros candidatos para fundar la asociación, nuestra labor ha sido:

b) Asesorarlos en cómo constituir formalmente una agrupación de estudiantes en la universidad; ayudarles a redactar los documentos, ponerlos en contacto con los responsables oportunos y "desatascar" algunas trabas administrativas. El interés de este paso radica en que les va a permitir solicitar subvenciones, locales o participar en ciertos actos.

c) Además de las donaciones de material, financiar sus actividades y necesidades –muebles, equipos, placas,

El trabajo descrito en esta publicación ha sido generado y patrocinado por el Departamento de Educación, Política Lingüística y Cultura del Gobierno Vasco en base a las ayudas para apoyar las actividades de grupos de investigación del sistema universitario vasco IT978-16 y por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto de investigación TEC2017-84011 y los fondos FEDER.

componentes, camisetas corporativas, etc.–. No es en absoluto sencillo pagar dinero a quienes no son trabajadores de la universidad. Por supuesto, la salida que hemos encontrado es cargar muchas de sus facturas, las relativas a actividades de promoción de la titulación entre estudiantes de secundaria, al presupuesto del dpto. El consejo del mismo no ha puesto objeción alguna a dedicar dinero a ese concepto.



Fig. 1. Viñeta creada por la asociación Bilbaodynamics. La pantalla del ordenador muestra su logotipo.

d) Conseguirles un local ha sido la piedra angular del proceso. Se puede decir que una asociación no es tal hasta que tiene un lugar que la identifica –es como su "cuerpo"–. También ha sido la tarea más ardua con diferencia: negociar con la dirección del centro y con el consejo de estudiantes. Al final, tuvimos que recurrir a una especie de trueque con los representantes del alumnado de la Escuela: el local a cambio de subvencionarles una actividad.

e) A modo de compensación por sus desvelos y dedicación, ofrecemos a los miembros de la asociación convertir alguna de sus tareas en un trabajo fin de grado, y les damos preferencia en prácticas de cooperación educativa promovidas por nuestro grupo de investigación.

III. Resultados obtenidos y problemas encontrados

Siguiendo, tal vez con cierta flexibilidad, al profesor de la Universidad de Zaragoza Javier Paricio Royo [2], hacer del aprendizaje universitario un proceso no traumático y, a la vez, eficaz en cuanto a la adquisición de conocimientos –competencias, para los puristas– requiere que cada estudiante viva al menos una "experiencia discente gratificante" –mejor si son dos, pero no es sencillo–: en pocas palabras, participar en un proyecto o actividad que le permita llevar a la práctica lo aprendido, experimentar con ello en situaciones próximas a la realidad y disponer de libertad para elegir temas, aplicaciones, compañeros e incluso horarios.

En esta línea, Bilbaodynamics ha conseguido proporcionar a sus socios experiencias gratificantes de dos tipos.

A. *Académicas*

Los miembros se apoyan en el aprendizaje, se ayudan a resolver dudas. Estudiantes que enseñan a otros alumnos, y que aprenden unos de otros.

Tienen un lugar que hace de laboratorio propio, con el fin de realizar las prácticas.

Se intercambian información académica relevante: seminarios, jornadas, etc.

El profesorado puede dirigirse a ellos para consultas u ofertas académicas, sobre todo relacionadas con las TIC. En nuestra escuela, el consejo de estudiantes es demasiado heterogéneo –12 grados y 4 másteres–, no es fácil identificar al alumnado de las TIC.

B. *Extra-académicas*

La asociación es un lugar de encuentro y amistad.

Sirve de referencia para atraer a otros estudiantes.

Hace de "valla publicitaria" de las titulaciones de las TIC. Son vistos y reconocidos por gente de dentro y fuera de la universidad.

Acuden a los profesores que hemos hecho de tutores o mentores, al objeto de ser asesorados sobre optativas o especialidades. También cuando tienen problemas administrativo-académicos.

Sobre esta última experiencia extra-académica, conviene ser cauto, a fin de no mezclar la exigencia en la evaluación con las relaciones que rodean a la asociación. Participar en ella, lógicamente, no otorga ventajas en pruebas de examen.

IV. Promocionando la ingeniería de telecomunicación y las TIC en general

Desde el punto de vista de publicitar la titulación, Bilbaodynamics nos ha permitido ampliar el abanico de posibilidades y dar aire fresco a algunas iniciativas que veníamos desarrollando.

a) Talleres de Navidad, Semana Santa y verano, dirigidos a alumnado de secundaria. Esta línea de acción está vedada a los dptos., ya que la titularidad de los grados es del centro, y no deben unos pocos dptos. erigirse en representantes de algún grado concreto –originaría conflictos con los demás–. Los alumnos, por el contrario, tienen esta vía libre, aunque han tenido que sortear algunas reticencias, y les hemos asesorado y subvencionado. Por esta vía, llegan a unos 80 alumnos de la ESO al año.

b) Montar un demostrador en las jornadas de puertas abiertas. De esta manera son los propios estudiantes los que explican la titulación a los de secundaria, en "su idioma".

c) Acudir con ellos a encuentros como la "Zientzia azoka" ("Feria de la ciencia") [3], "First Lego League Euskadi" [4], "Maker Faire" [5], "24 h de la innovación" [6]. En definitiva, acontecimientos que pueden fomentar vocaciones científico-tecnológicas en los adolescentes –y en las que al profesorado nos resulta difícil participar–.

La asociación ofrece, por último, ventajas más relacionadas con las salidas profesionales de los egresados. Bilbaodynamics es también una cantera a la que recurrir para la búsqueda de doctorandos y colaboradores del dpto., para responder a empresas que desean contratar alumnos recomendados y, sobre todo, promocionar el máster de Teleco, antes de que huyan del grado al mercado de trabajo.

V. CONCLUSIONES

Ciertamente, no es viable demostrar que esta acción, ni el resto de las integradas en el plan general de promoción, haya contribuido a incrementar la matrícula en el grado de Telecomunicación. Principalmente, debido a que la hipotética relación de causa-efecto no puede someterse a contraste: no es factible establecer dos escenarios comparables en los que poner a prueba los efectos de esta medida y de su ausencia; tampoco tenemos el control de los destinatarios últimos de los talleres.

En un primer momento, surge la tentación de recurrir a la variación de la matrícula; sin embargo, sería simplificar demasiado explicar su evolución por esta mera acción. De hecho, en los últimos tres años académicos la matrícula ha descendido ligeramente –Bilbaodynamics ha irrumpido hace dos cursos–.

Por el contrario, los primeros datos de preinscripción en Telecomunicación para 2018-19 apuntan un ligero incremento. Tampoco parece justo atribuirlo a los talleres. Aun así, los indicios llevan a esperar una mejora en la situación general.

Un resultado prometedor de esta comunicación sería debatir el problema de partida y las posibles soluciones al ser expuesta oralmente en la sesión correspondiente.

Referencias

[1] https:// bilbaodynamics.com

[2] Javier Paricio Royo, "¿Qué es lo importante? Factores para potenciar el éxito académico del alumnado en cursos y titulaciones", Servicio de Asesoramiento Educativo, 2015, UPV/EHU.

[3] https://zientzia-azoka.elhuyar.eus/es

[4] https://www.innobasque.eus/microsite/first-lego-league-euskadi/

[5] https://bilbao.makerfaire.com/

[6] https://lnkd.in/e5vP5TZ

Proyecto Exprés: Creación de grupos interdisciplinares cohesionados a través de un proyecto parte de asignaturas de distintos grados

Carlos Romero Piqueras
Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España
carlos.romero@unizar.es

Eduardo Manchado Pérez
Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación
Universidad de Zaragoza
manchado@unizar.es

Teresa Blanco Bascuas
Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)
Universidad de Zaragoza
tblanco@unizar.es

Roberto Casas Nebra
Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España
rcasas@unizar.es

José María López Pérez
Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España
chlopez@unizar.es

***Abstract*— Como parte de una experiencia de innovación ya asentada, estudiantes de electrónica y diseño industrial elaboran colaborativamente un proyecto común para sus respectivas asignaturas. Se forman así grupos interdisciplinares que desarrollan productos industriales con contenido electrónico, orientado al mercado y en colaboración con una empresa. Parte del trabajo trata de un diseño preparatorio llamado "proyecto exprés". Tras varios años mejorando la metodología, el presente trabajo presenta su formalización y evaluación en términos de adecuación a la consecución de competencias transversales, mejora de la ratio esfuerzo / aprendizaje y optimización de la adquisición de competencias técnicas tanto propias como cruzadas entre los dos tipos de estudiante.**

Keywords*— *Aprendizaje basado en proyectos, trabajo interdisciplinar, aprendizaje colaborativo. common ground.

I. INTRODUCCIÓN

El aprendizaje basado en proyectos (ABP) tiene una importancia capital en las enseñanzas técnicas, dado que uno de sus objetivos principales es la capacitación para el desarrollo de proyectos. Esta metodología, ampliamente documentada [1], favorece el aprendizaje de la técnica llevándolo más allá del dominio de las materias propias de la disciplina en cuestión, a través de la puesta en juego de competencias de desarrollo y puesta a punto de proyectos reales y funcionales.

Si los proyectos se realizan en grupo, se consigue un salto cualitativo al incluirse competencias de trabajo en equipo, aprendizaje cooperativo [2], aprendizaje entre pares y otras de carácter social [3].

No obstante, el ABP convencional se limita al desarrollo de proyectos de materias concretas en el entorno controlado de talleres y laboratorios, y no suele cruzarse con otras disciplinas, cuando esta situación es habitual en la empresa cuyo carácter es fuertemente interdisciplinar

En la experiencia presentada en este artículo se intenta responder a necesidades formativas de los ingenieros en cuanto a competencias transversales, con énfasis en lo interdisciplinar. En los últimos 9 años, profesores de electrónica y de diseño industrial han desarrollado una metodología, así llamada, Proyectos Híbridos [4], que intenta cubrir estas necesidades.

La estrategia asocia trabajos de distintas asignaturas, de distintas titulaciones que convergen en un objetivo común. Consiste en formar, con alumnos de diferentes materias y titulaciones, grupos interdisciplinares para desarrollar el mismo proyecto, cada cual abordando la parte que a su asignatura atañe, pero teniendo que trabajar colaborativamente a lo largo de todo el proceso. Los estudiantes tienen que negociar en las sucesivas fases de desarrollo del proyecto, simulándose un entorno muy cercano a la realidad industrial, donde actores de distintos departamentos sacan adelante un producto común. En el caso expuesto se trata de estudiantes de las siguientes asignaturas. Pertencen a la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza.

- Laboratorio de Diseño Electrónico, de 4º del Grado en Ingeniería Electrónica y Automática. Optativa de 6 créditos, con 4 horas presenciales en el laboratorio; se trata de una asignatura de "solo prácticas".
- Metodología de Diseño, de 4º del Grado en Ingeniería de Diseño Industrial y Diseño de Producto. Obligatoria de 9 créditos, 2 horas de teoría y 4 de prácticas a la semana.

El aprendizaje está basado en la colaboración entre personas de distintas disciplinas y procedimientos de trabajo, que aportan puntos de vista diferentes y complementarios. Este enfoque potencia el desarrollo de habilidades y competencias que son esenciales en el ejercicio profesional dentro de la empresa, destino natural de los estudiantes de la ingeniería, como la negociación, colaboración y comunicación entre profesionales distintos, la gestión de incertidumbres y del estrés, actitud profesional, el trabajo en equipo, aprendizaje entre pares y la relación con superiores, subordinados y clientes. Estas actividades tienen una presencia constante en la labor empresarial diaria y es esencial tener la capacidad de manejarse en ese entorno social con soltura y eficacia. A las competencias

que llevan a este modus operandi se les puede llamar competencias transversales profesionalizantes, es decir directamente orientadas al ejercicio profesional.

En los últimos 3 años se cuenta además con la colaboración de una empresa de alcance internacional (B/S/H/) que actúa como cliente, proponiendo un tema de innovación, participando en la guía de los proyectos y llevando a un entorno de realidad a los estudiantes.

Otro hito de importancia en el desarrollo de la metodología fue el Proyecto Exprés. El funcionamiento óptimo de estos grupos interdisciplinares tiene sus dificultades, ya que los estudiantes de electrónica y los de diseño, aun siendo de ambos de ingeniería, utilizan lenguajes y metodologías muy distintos. Efectivamente, se detectaron disfunciones en el trabajo de algunos grupos, así como grupos que terminaban trabajando por separado y, también parcialmente, estudiantes que no se habían impregnado de la metodología interdisciplinar, aun habiendo logrado éxito en el plano técnico.

Así, se planteó la necesidad de articular los equipos para que su interacción se base en trabajo efectivamente colaborativo y no sea un mero intercambio de informaciones y demandas. Para conseguirlo se planteó una metodología cuyo objetivo es que los equipos establezcan un cauce de comunicación, entiendan las funciones y capacidades de cada uno y articulen una dinámica de trabajo basada en la colaboración. Proviniendo de estudios distintos, cada uno de ellos tiene un corte formativo y experiencial muy diverso, lo cual se refleja principalmente en la concepción de lo que es un proyecto (sesgadamente técnológico en el caso de los electrónicos y con una visión global de producto en el caso de los diseñadores) y en las metodologías que usan unos y otros a lo largo de su desarrollo.

Para establecer una base compartida (*common ground* [5]) sobre la cual poder trabajar cooperativamente se ideó el Proyecto Exprés, un pequeño proyecto que se aborda al comienzo de las clases con el objetivo de configurar los grupos, establecer vías de comunicación, poner en juego metodologías conjuntas de desarrollo de producto e iniciar un aprendizaje cruzado necesario para la colaboración (los electrónicos aprenden rudimentos de metodología de diseño y los diseñadores nociones de electrónica [6]).

La filosofía de trabajo interdisciplinar entre diseñadores y electrónicos se ilustra en la fig. 1. Además de trabajos técnicos propios de cada disciplina existe una cancha común de trabajo colaborativo en la que participan las dos partes del equipo. Hay que señalar que en las técnicas de creatividad y de generación de conceptos propias de diseño industrial, participan también los electrónicos aportando una visión de viabilidad e inspirando a los diseñadores con las posibilidades tecnológicas disponibles.

En la fig. 2 aparecen estudiantes de diseño y electrónica aplicando la técnica 6/3/5 de generación de conceptos [7].

II. Evolución del contexto de la experiencia

La metodología utilizada en el desarrollo de la actividad de proyectos híbridos ha experimentado una considerable evolución a lo largo de sus sucesivas ediciones.

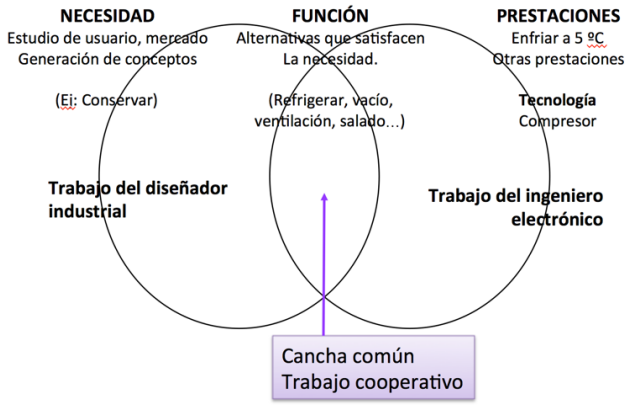


Fig. 1. Ejemplo de esquema de trabajo interdisciplinar. La colaboración abarca todo el proceso de desarrollo de manera que se establece una cancha común donde se trabaja compartiendo conocimientos y metodologías, a partir de lo cual se toman las decisiones.

III. Replanteamiento del problema y objetivos perseguidos

Al principio la actividad se planteó sin contar con referencias metodológicas precisas y pretendiendo únicamente aportar un enfoque docente inspirado en la simulación lo más realista posible del entorno profesional en el entorno de aprendizaje. Inicialmente la participación en la misma por parte de los estudiantes se ofrecía como una opción voluntaria que tenía un reconocimiento en la calificación posterior de las respectivas asignaturas. Del mismo modo el número de profesores participantes era muy reducido, uno o dos profesores por asignatura.

En este planteamiento pionero la primera observación fue que la calidad de los resultados de aprendizaje debía desligarse de la calidad de los propios resultados de los proyectos. A menudo se observaba cómo la dificultad de entendimiento y coordinación entre estudiantes procedentes de diferentes titulaciones acababa propiciando un peor resultado técnico de los proyectos.

No obstante, los estudiantes participantes reconocían el valor formativo de la experiencia, incluso considerando que el producto desarrollado podía ser un fracaso, porque habían adquirido ciertas habilidades que entendían eran valiosas para su aplicación futura, como la capacidad de negociar entre distintos, de empatizar, de trabajar en equipo o de enfrentar conflictos. Existía un factor desmotivador que aparecía en la calificación obtenida, que se centraba únicamente en la evaluación del resultado técnico del proyecto, y que solía ser menor que otros estudiantes que no habían participado, aunque se ponderaba con la valoración extra que se ofertaba a los voluntarios.

Inmediatamente se consideró por parte del equipo docente que ese aprendizaje transversal era como mínimo igual de relevante que el aprendizaje estrictamente técnico, y que, como tal, debía ser evaluado y pasar a ser un contenido extendido a todos los estudiantes y de carácter obligatorio.



Fig. 2. Puesta en marcha en el aula de la técnica de generación de conceptos 6/3/5 por estudiantes de electrónica y diseño industrial.

La dificultad en las siguientes ediciones residió en la necesidad de gestionar y coordinar un grupo elevado de estudiantes (pasó de 15-20 estudiantes en total a aproximadamente 75 entre las dos asignaturas), en una actividad que requiere de un seguimiento más estrecho y cercano.

Además, para desarrollar la actividad en estas condiciones, era necesario la participación de todos los profesores que impartían las asignaturas, lo que suponía un esfuerzo extra de coordinación docente. A este respecto, cabe destacar asimismo el hecho de que no solo los equipos de estudiantes sino el grupo de profesores es un equipo multidisciplinar; por tanto el common ground ha de ser efectivo tanto intrínseca como extrínsecamente en interrelaciones a varios niveles, lo cual hace el proceso un tanto complejo como se muestra en la fig. 3.

Paralelamente, el equipo docente comenzó a documentar la experiencia y a presentar publicaciones y ponencias en congresos [6][7]. La excelente acogida por parte de otros colegas constituyó en este punto un factor altamente motivante, y generó el acceso al conocimiento de otras experiencias que aportaban ideas capaces de enriquecer el proyecto.

En las siguientes ediciones pudo observarse que cuando se lograba alcanzar un buen resultado en el desarrollo de las competencias transversales, este venía acompañado de un buen resultado también en el ámbito técnico. Y cuando se producían fracasos en el ámbito técnico, venían precedidos de situaciones de conflicto no resuelto, algo que se reflejaba también en las encuestas de valoración que realizaban los estudiantes al final de la experiencia. Por este motivo, el equipo docente entendió que podía ser interesante plantear algún tipo de desarrollo lineal de la experiencia, donde una primera fase sirviera para desarrollar

las competencias transversales, y una segunda fase fuese de aplicación, consolidación y obtención de resultados, lo que debía acarrear el éxito académico, la motivación de los estudiantes y su buena valoración del esfuerzo realizado.

Se propuso así un primer proyecto introductorio, con menor peso en la calificación final, y un proyecto de mayor trascendencia. Pero los resultados no acabaron de llegar, en gran parte porque si en el proyecto introductorio no se conseguía un buen encaje de los equipos, el conflicto se extendía a la segunda fase. Además la estrategia de trabajo se basó en la aplicación para esta primera fase de herramientas de trabajo más cercanas a los estudiantes de ingeniería de diseño, lo que desequilibraba la implicación de los participantes procedentes del ámbito de ingeniería electrónica, que además no acababan de ver el interés y utilidad de este esfuerzo hasta que la asignatura no estaba ya muy avanzada, es decir, faltaba motivación de inicio. El siguiente paso se orientó, pues, a conseguir que los estudiantes entendieran la importancia de los objetivos de esta primera fase y que los trabajasen de un modo más equilibrado y cooperativo.

En este punto se optó por diferenciar aún más el aporte de la primera fase y la segunda. Aprovechando la consolidación de la colaboración con B/S/H/ para el proyecto central de la asignatura, que ofrece a los estudiantes la oportunidad de obtener un logro real con un potencial empleador, el argumento a utilizar con los estudiantes fue que la realización del primer proyecto debía servir de preparación para afrontar el segundo con las mejores garantías, algo que resulta altamente motivante. Para visibilizar aún más este carácter, el primer proyecto pasó a llamarse Proyecto Exprés, y a adoptar algunas características que lo hacen especialmente reconocible.

En primer lugar deben constituirse los equipos de trabajo. En este punto se ha optado por diferentes alternativas: en alguna ocasión la asignación ha sido por sorteo, en otras ocasiones se ha realizado una "subasta de destinos": cuando el número de estudiantes electrónicos matriculados era bajo, se constituían en primer lugar los equipos de diseñadores y a continuación se les proponía realizar una presentación como equipo antes los estudiantes de electrónica para que éstos decidiesen voluntariamente con quien trabajar, lo que les confería una grado alto de relevancia dentro de la estructura de trabajo.

Una vez constituidos los equipos, deben redactar y entregar un reglamento interno de funcionamiento que detalla las normas de trabajo, los compromisos de los integrantes y las posibles sanciones. A partir de este punto comienzan a trabajar.

Se ha observado que el éxito del Proyecto Exprés depende de que además se den ciertas características:

- Debe tener un nivel alto de exigencia que se refleje en una adecuada valoración en la evaluación final, para que sea tomado en serio.

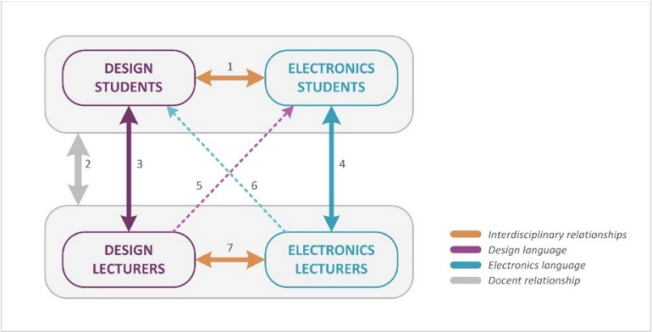


Fig. 3. Mapa de relaciones.

- Debe tener un tema que favorezca la participación, la empatía y la colaboración. A tal efecto se proponen temas sorprendentes, con un componente lúdico, desenfadado, que reste dramatismo a la fase de desarrollo y propicie el buen ambiente y la diversión dentro del equipo, lo que aumenta la motivación de los participantes.
- Debe permitir la experimentación y el prototipado, para que los estudiantes visibilicen rápidamente su potencial como equipo y alcancen resultados.
- Debe ser un desarrollo intensivo, es decir, los estudiantes desarrollan únicamente esta actividad y en un plazo de tiempo lo más breve posible.

El Proyecto Exprés tiene además una estructura que condensa en un plazo breve de tiempo las mismas fases y secuencia de trabajo que se desarrollará en el proyecto final.

Entre los resultados cabe destacar la consecución de presentaciones creativas e innovadoras. Por este motivo la última iniciativa puesta en marcha fue invitar a responsables de B/S/H/ a asistir a las presentaciones antes de lanzar el proyecto que se desarrolla con su colaboración. Se trata de un mensaje de refuerzo y confianza en el potencial de los equipos por parte de los profesores, una excelente carta de presentación de los estudiantes del curso hacia la empresa participante y un modo de incentivar el desarrollo de presentaciones bien trabajadas para un proyecto, en principio, menor.

IV. Replanteamiento del problema y objetivos perseguidos

En el último curso, el equipo de profesores se planteó una reflexión sobre el Proyecto Exprés en términos de las competencias transversales deseadas, la efectividad a la hora de conseguir equipos cohesionados con una colaboración interdisciplinar real y el éxito en terminar con un producto operativo. Por una parte se seguían detectando disfunciones que, aunque hay que asumir que siempre pueden ocurrir, es preciso revisar y, por otra, había una estimación por parte de los estudiantes de una excesiva complejidad y tamaño de este primer proyecto. Efectivamente, en muchas ocasiones el trabajo en el Proyecto Exprés se alargaba más allá de los límites establecidos solapándose con el trabajo para la empresa.

Es un hecho constatable a la vista de los dos productos desarrollados (Exprés y empresa) la mejora que se produce de uno al otro, como corresponde a la misión del Proyecto Exprés como entrenamiento para el proyecto de empresa, de mayor entidad. Esto se aprecia tanto por la calidad de conceptos de producto como por la circuitería electrónica construida. Por esta razón no se considera eliminar el Proyecto Exprés, ya que sus objetivos siguen siendo necesarios y sus logros son constatables. En consecuencia, el planteamiento es una mejora para solventar los fallos detectados sobre la base de idear nuevos objetivos, que son:

- Disminuir el estrés que había producido este proyecto en cursos anteriores. Este estrés estaba producido por las incertidumbres iniciales que se mantenían demasiado en el tiempo e interferían con el desarrollo factual de la electrónica que se veía entorpecido.
- Calibrar el esfuerzo invertido por los estudiantes y ajustarlo a los plazos de las asignaturas. Es necesario ajustar este esfuerzo a la capacidad de los estudiantes al empezar la asignatura aún a costa de que este proyecto sea menos ambicioso, y en línea con que se trata de un entrenamiento. Por otra parte, se plantea la exigencia de que esté limitado en el tiempo y no se solape con el proyecto empresa, lo cual resulta en una causa añadida de estrés.
- Facilitar que los proyectos se terminen y sean operativos en plazo, evitando la frustración que sufren los estudiantes cuando no es así. Por su carácter de preparación, el Proyecto Exprés debería dar satisfacción y entusiasmo al estudiante para abordar el proyecto grande, de ahí la importancia de este objetivo.
- Solventar las dificultades que presentan los cambios tardíos provinientes del subgrupo de diseño industrial. El avance en las fases de desarrollo entre el trabajo de desarrollo de concepto (más largo) y el de la electrónica tiene, de forma inherente, un desfase temporal considerable, mientras que la fabricación de placas y la compra de componentes obligan a adelantar los tiempos de desarrollo de la electrónica. Se plantea solventar este desfase sin merma de la calidad de colaboración a lo largo de todo el proceso.
- Aumentar la percepción de madurez como aspirante a profesional por el hecho de abordar un diseño completo y operativo. Así se pretende conseguir una actitud de confianza para abordar el proyecto empresa al considerarse el estudiante un profesional capaz que forma parte de un equipo potente.

V. Propuesta y desarrollo de nueva metodología de proyecto exprés

Para alcanzar estos objetivos se plantea un giro importante en la metodología del Proyecto Exprés, que se centra en los siguientes ítems.

- Planificación temporal. El proyecto se limitará a un tiempo determinado (3 semanas) formalizando estrictamente las tareas y los plazos. Tendrá dedicación intensiva.
- Fomentar el trabajo independiente del equipo de estudiantes, eliminando algunas de las guías del anterior paradigma y limitando la supervisión a superar escollos que puedan provocar retrasos. Incluyendo incluso algún reto-trampa para que tropiecen en los problemas habituales y dirigirles a la solución aplicando la metodología, con lo que apreciarán inmediatamente su bondad y mejorará la percepción de su aprendizaje.
- Realizar y poner a punto el prototipo en placa blanca en vez de sobre placa impresa. Esto evita tener que abordar el diseño y fabricación de la placa de circuito impreso acortando fuertemente el tiempo de desarrollo. Además, y no menos importante, el prototipo es flexible y

permite adaptarse a los cambios que puedan surgir en el concepto de producto. Por fin, se elimina una dificultad capital como es la puesta a punto de una placa, que es frecuente que presente problemas difícilmente solubles sobre todo al ser la primera que se diseña. Estos problemas han causado en varias ocasiones que el Proyecto Exprés no termine siendo operativo. El diseñar y poner a punto una primera placa como entrenamiento para el proyecto empresa sigue siendo un trabajo de interés ya que siempre se experimenta una sustancial mejora en la segunda placa; por esta razón, una vez entregado el Proyecto Exprés en placa blanca se aborda el diseño y fabricación de la PCB como una suerte de prácticas pero fuera del Exprés, ahorrando tiempo y estrés.

- Contar con un set de componentes a disposición de los proyectos evitando el problema de compras y retrasos. Incluyen sensores y actuadores variados, procesador, sistemas de alimentación y de comunicaciones. Por lo que respecta a las maquetas, se dispone de los medios y materiales del Taller de Diseño Industrial, así como de impresión 3D.

Sobre la base de estos requisitos se estructura el Proyecto Exprés que tiene como tema en el curso 2017-2018 desarrollar un artefacto capaz de provocar risa. A continuación se describe cómo fue planteado el proyecto a los estudiantes.

Como se especifica en su brief, el proyecto implica la realización de un análisis en profundidad de la tecnología disponible, las características de la risa, los tipos de estímulo capaces de despertar esa respuesta, así como de las posibles funciones a desarrollar por el producto y su modo de accionamiento, tratando de conseguir conclusiones que produzcan conceptos creativos, alternativos e innovadores.

Las fases, su planificación temporal y los entregables en cada momento se especificaron en el brief de la siguiente manera. El calendario puede consultarse en la fig. 4.

SEMANA 1:

1ª fase: Organización del equipo, planificación del proceso.

Durante esta fase los estudiantes deberán organizar su equipo. Deberán planificar el desarrollo del proyecto y realizar un calendario o diagrama de tiempos que marque las fases a cumplir.

Todo el proyecto se realizará mediante el trabajo en equipo; haciendo puestas en común de toda la información en reuniones en las que se analice, critique y contraste la información para concluir en ideas básicas para su posterior desarrollo.

Entregable 1. Documento de equipo, debe constar de: nombre del equipo, miembros, lema, avatar, reglamento interno que debe definir la forma de trabajo, medios y posibles sanciones por el incumplimiento del mismo.

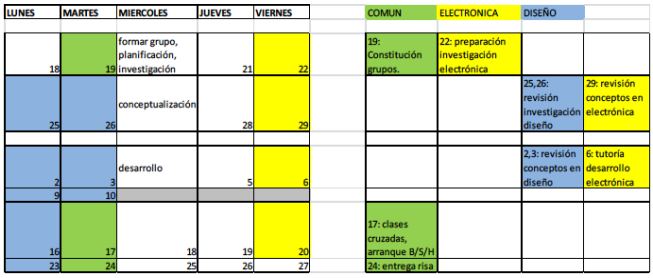


Fig. 4. Calendario del proyecto Exprés (en este curso fue el llamado proyecto Risa) con indicación de tareas separadas y comunes en horario de clases. En blanco trabajo en grupo de los estudiantes fuera del aula.

2ª fase: Búsqueda de información y análisis.

Los estudiantes deberán distribuirse y ejecutar la tarea de recopilación de información relevante, y de elaboración de esa información de modo que pueda ser compartida por los miembros del equipo y constituya el punto de partida para identificar oportunidades para la propuesta de conceptos de producto. Los estudiantes de electrónica trabajan sobre todo las capacidades de componentes electrónicos relacionados con los objetivos.

SEMANA 2:

3ª fase: Generación de conceptos.

Tomando como punto partida el trabajo de la primera fase se han de proponer un mínimo de dos conceptos de producto por cada equipo.

Entregable 2. Presentación de conceptos, Propuesta de DOS conceptos de producto (mínimo). Los conceptos propuestos serán justificados tomando como base la información recopilada en la segunda fase.

4ª fase: Desarrollo final.

Los conceptos más viables serán desarrollados en su totalidad, continuando este desarrollo a través de bocetos más elaborados y que muestren la evolución funcional y la exploración formal; en esta fase se evaluarán tanto el razonamiento para la consecución de la función como las alternativas formales que pueden ayudar a cumplir mejor esta función, y el desarrollo de alternativas técnicas para garantizar el correcto funcionamiento del producto. Durante esta fase se deberán solucionar las características técnicas del producto y definir con precisión los procesos productivos y materiales a utilizar en su fabricación.

Paralelamente, se desarrollará el sistema electrónico mediante montajes reales, explorando sus funciones y restricciones. Será el momento de seleccionar los componentes concretos que mejor se ajusten a las necesidades. Estos desarrollos serán debidamente documentados con descripciones escritas, esquemas de circuito y simulaciones comentadas, y tendrán como resultado el montaje y puesta a punto de un prototipo.

Entregable 3. Prototipo y testeo, informe que recoja cómo se realizó el testeo, qué objetivos se perseguían y que mejoras ha reportado.



Fig. 5. Prototipo de uno de los Proyectos Exprés, completamente integrado en la maqueta y funcional. Se trata de un objeto que dos personas tienen que sujetar con los dientes por cada uno de sus extremos. Detecta desequilibrio y genera sonidos de recompensa y castigo. En otros proyectos el castigo era una pequeña descarga eléctrica, una vibración, etc.

Entregable 4. Descripción del producto indicando en cada caso planos de montaje, arquitectura de bloques, esquemas electrónicos, etc.

Entregable 5. Presentación final.

En el tiempo previsto se entregaron los proyectos con muy buenos resultados, ya que todos ellos resultaron ser funcionales y 5 de 10 fueron integrados en su maqueta (logro difícilmente alcanzado en otras ediciones). Las causas de este éxito se debe principalmente a la disponibilidad de los componentes y a montar el prototipo en placa blanca o al aire sin preocuparse por la PCB. Ésta se fabricaría inmediatamente después.

En las fig. 5 y 6 se puede observar sendos los prototipos del Proyecto Exprés cuyo tema era la risa.

VI. Evaluación y análisis de resultados

La evaluación del "Proyecto Exprés" como metodología docente se evalúa con alumnos y profesores de las asignaturas "Laboratorio de Diseño Electrónico", de 4º del Grado en Ingeniería Electrónica y Automática y "Metodología de Diseño", de 4º del Grado en Ingeniería de Diseño Industrial y Diseño de Producto, ambas de la Universidad de Zaragoza.



Fig. 6. Uno de los Proyectos Exprés en su edición "Risa", integrado en la maqueta y funcional. Es un pequeño robot que reacciona a la presencia y la distancia, huyendo según ciertos criterios y reaccionando así mismo cuando se le despega del suelo.

Como se ha comentado anteriormente, tras varios años de experimentación y mejora de la metodología de forma intuitiva, en el curso 2017/18 se formalizan y ejecutan los criterios para una evaluación estructurada, que se relacionan con la consecución de competencias transversales, con la mejora de la ratio esfuerzo / aprendizaje y con la adquisición de competencias técnicas tanto propias como cruzadas entre los dos tipos de estudiante.

La orientación de la evaluación se basó en métodos mixtos cualitativos y cuantitativos, siguiendo las bases teóricas de la metodología de evaluación "Xassess" [7]. Enconcreto se definió una combinación de métodos relacionados con diferentes estrategias, en todo caso considerando tanto la perspectiva de los estudiantes como la de los profesores.

La metodología de evaluación multi-instrumental incluyó:

- Observación y notas de campo por parte de los profesores responsables de la presente experiencia a lo largo de todo el curso.

- Una comparativa entre dos encuestas al alumnado, realizadas al principio y al final de curso, que contenían preguntas tanto abiertas como cerradas. Ambas anónimas, se enviaron a los alumnos con la herramienta de Google Forms. En ambos casos las preguntas eran las mismas, pero con diferente enfoque: en la primera se pedía la visión prospectiva del alumno, mientras que en la segunda los alumnos respondían sobre la base de la experiencia que habían adquirido en el curso, por tanto se buscaba su visión perceptual y crítica. En la primera encuesta responden 12 alumnos de un total de 17 en el caso del grado en electrónica (un 70%) y 38 alumnos de un total de 60 en el caso del grado de diseño (un 63%); en la segunda encuesta responden 17 alumnos en el caso del grado de electrónica (100%) y 44 alumnos en el caso del grado de diseño (un 73%). Por tanto podemos considerar que en ambas encuestas los resultados cuantitativos son significativos estadísticamente. Los objetivos de la estructura de doble encuesta eran principalmente dos: la comparativa entre expectativas y percepción posterior y la comparativa de resultados entre especialidades.

- *Focus group* informales que mantienen los profesores con los alumnos en los grupos de prácticas. En ellos se buscan específicamente cuestiones emergentes, y se recogen comentarios e impresiones generales que expresan los alumnos en ambiente distendido, y que no se reflejan en las encuestas (de carácter más neutro).

- Entrevistas finales con los profesores de ambas asignaturas (3 en el caso de diseño y 2 en el caso de electrónica), orientadas a recoger su visión comparativa con los resultados de años anteriores (así como sus impresiones derivadas de los focus group informales a sus respectivos grupos de alumnos. .

El procedimiento fue el siguiente:

- Ejecución de la primera encuesta a los dos grupos de alumnos (primer mes del curso). Comparativa entre expectativas y visiones de diseñadores y electrónicos.
- Observación y notas de campo por parte de los profesores responsables del paper (a lo largo de todo el curso). Combinación posterior de resultados con segunda encuesta.
- Ejecución de la segunda encuesta a los dos grupos de alumnos (penúltima semana del curso). Triangulación de datos con la primera encuesta.
- Recogida de datos emergentes en los *focus group* (última semana del curso. Complementación con el resto de resultados.

La fig. 7 muestra la opinión de los alumnos en varios puntos:

- Valora el trabajo con la otra especialidad
- Valora tu entendimiento con la otra especialidad
- ¿En qué medida crees que la otra especialidad te aportará nuevos conocimientos?
- Valora el interés que crees que tiene trabajar en proyectos híbridos para aprender a trabajar en grupo
- Valora el interés que crees que tiene trabajar en proyectos híbridos (diseño-electrónica) en tu formación
- Valora el interés que crees que tiene trabajar en proyectos híbridos (diseño-electrónica) para tu futuro trabajo

En general la opinión de los estudiantes es siempre positiva, aunque se observa que tienen unas expectativas superiores al inicio de lo que resulta su percepción final. Es interesante relacionar estos datos con las razones que dan los alumnos en las entrevistas posteriores, donde indican que las principales barreras a las que se enfrentan son la dificultad de desarrollar un

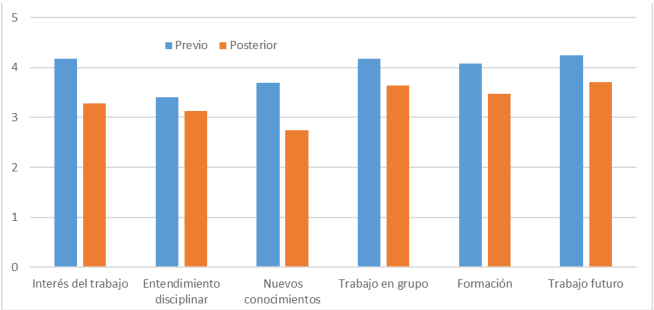


Fig. 7. Opinión de los estudiantes acerca de varios aspectos de los proyectos híbridos.

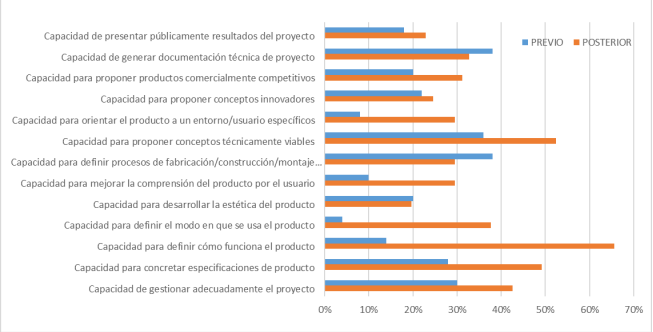


Fig. 8. Percepción de las competencias adquiridas mediante la metodología.

proyecto profesional con una metodología a la que no están acostumbrados (una de las cuestiones que reiteran más los estudiantes de electrónica son los cambios que ellos consideran tardíos por parte de los diseñadores; aunque sí reconocen el aprendizaje derivado de esta barrera), con estudiantes de perfil diferente al suyo (aunque cuando concretan, las razones que esgrimen son más de tipo individual, por ejemplo el compromiso con el proyecto que ha tomado un determinado compañero de la especialidad contraria), y la diferencia de pesos académicos de las asignaturas hermanadas.

Al pedirles que evalúen específicamente las capacidades trabajadas vemos que la tendencia se invierte; es decir, que previamente opinaban que no iban a mejorar tanto como luego reconocen haber mejorado. La fig. 8 indica para diferentes ámbitos profesionales, qué porcentaje de estudiantes consideran van a mejorar y han mejorado respectivamente.

En este caso, al contrario que con la primera pregunta de opinión, se ve cómo mejora su percepción de formación en varios ámbitos por el hecho de abordar un diseño completo y operativo.

Finalmente, analizando los resultados alcanzados por los estudiantes, el 93% de los proyectos ha mejorado en acabado y alcance respecto a otros años (un 65%).

Como conclusión, se pueden confirman las barreras previstas (tanto a partir de la literatura como a partir de las experiencias previas) en el trabajo multidisciplinar, pero se advierte un aprendizaje muy interesante. Los alumnos, que idealizan en principio la realidad del trabajo multidisciplinar, se topan con las barreras que suelen darse en este ámbito. Sin embargo, reconocen su aprendizaje al respecto, superando sus expectativas previas y en puntos que corresponden con los objetivos iniciales de la metodología.

VII. Conclusiones

El "Proyecto Exprés" es parte de una experiencia de innovación docente ya asentada, que involucra a estudiantes de los grados de ingeniería electrónica y de ingeniería de diseño industrial. Se forman grupos interdisciplinares que desarrollan productos industriales con contenido electrónico, orientado al mercado y en colaboración con una empresa. El Proyecto Exprés se inserta al inicio del proceso como proyecto preparatorio. Tras varios años mejorando la metodología, el presente trabajo presenta su formalización y evaluación en términos de adecuación a la consecución de competencias transversales,

mejora de la ratio esfuerzo / aprendizaje y optimización de la adquisición de competencias técnicas tanto propias como cruzadas entre los dos tipos de estudiante.

La percepción de los estudiantes en cuanto a las competencias transversales y el valor del trabajo disciplinar aparece claramente en las encuestas, cumpliéndose uno de los objetivos principales de este trabajo. Una de las cuestiones más sugerentes es que los alumnos idealizan en principio la realidad del trabajo multidisciplinar, pero se topan en la práctica con las barreras que suelen darse en este ámbito. Sin embargo, reconocen su aprendizaje al respecto, superando las expectativas de aprendizaje que previamente habían hecho.

Una de las decisiones que se tomó en el proceso de diseño del Proyecto Exprés y que ha ofrecido un avance considerable fue la supresión de la presión técnica para los estudiantes de electrónica. Es decir, en esta parte de la asignatura, los electrónicos no tienen que fabricar PCB; esto se ha conseguido poniendo a su disposición un set de componentes. El hecho de evitar problemas técnicos hace que se desarrollen más fácilmente las competencias transversales, al poder centrarse los estudiantes en las labores colaborativas. Estas tareas son abordadas más delante, de manera que no se descuidan.

Se constata además una mejora del acabado de los proyectos desarrollados. Todos ellos resultaron operativos, no solo evitando la frustración del fracaso si no que además incrementa la motivación para abordar el proyecto posterior con la empresa y la satisfacción de haber logrado el logro en equipo, dando valor a la eficacia de la metodología interdisciplinar.

AGRADECIMIENTOS

A todos los estudiantes que han participado en las ediciones de proyectos híbridos; a los profesores que en ocasiones anteriores han participado. Al Vicerrectorado de Política Académica de la Universidad de Zaragoza por su apoyo y reconocimiento durante todos estos años. A la Dirección de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura por su sensibilidad y apoyo a las experiencias de innovación docente. A la empresa B/S/H/ por involucrarse en el proceso formativo de los estudiantes y dar valor a su potencial innovador.

REFERENCIAS

[1] M. Daun, A. Salmon, T. Weyer, “Project-based learning with examples from industry in university courses: an experience report from an undergraduate requirements engineering course” IEEE 29th International Conf. on Software Engineering Education and Training (CSEET), 2016.

[2] Y. Mohd, Khairiyah, “Cooperative problem-based learning (CPBL): a practical PBL model for engineering courses”. In: 2011 IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON 2011. IEEE Explorer, 366 -373.

[3] A. R. Jassawalla, “An examination of collaboration in high-technology new product development processes”. Journal of Product Innovation Management, 15(3), 237-254, 1998.

[4] J. M. López, E. Manchado, R.Casas, I. López, T. Blanco, “Adquisición de competencias profesionales mediante proyectos interdisciplinares”. II Congreso Internacional sobre Aprendizaje, Innovación y Competitividad (CINAIC 2013).

[5] Beers, P. J., Boshuizen, H. P., Kirschner, P. A., & Gijselaers, W. H. (2006). Common ground, complex problems and decision making. Group Decision and Negotiation, 15(6), 529-556.

[6] Blanco, T., Casas, R., Manchado-Pérez, E., Asensio, Á., & López-Pérez, J. M. (2017). From the islands of knowledge to a shared understanding: interdisciplinarity and technology literacy for innovation in smart electronic product design. International Journal of Technology and Design Education, 27(2), 329-362.

[7] M. L. Cuenca González, F. Alarcón Valero, M.D.M. Alemany Díaz, A. Boza Garcia, M, Fernández Diego, M. L. Gordo Monzó, L. Ruiz Font. La técnica 6-3-5 extendida, para la competencia de creatividad, innovación y emprendimiento (2016). http://hdl.handle.net/10251/68332.

[8] E. Manchado, C. Romero, T. Blanco, R. Casas, J. M. López, “Una experiencia de aprendizaje colaborativo, basada en la adaptación de metodologías de design thinking”, III Congreso Internacional sobre Aprendizaje, Innovación y Competitividad (CINAIC 2015).

[9] T. Blanco, A. Berbegal, R. Blasco, R. Casas, R. (2016). Xassess: crossdisciplinary framework in user-centred design of assistive products. Journal of Engineering Design, 27(9), pp. 636-664

Common Understanding Area (CUA): Una herramienta de diseño x-disciplinar para la innovación tecnológica

Teresa Blanco Bascuas
Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España
tblanco@unizar.es

Roberto Casas Nebra
Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España
rcasas@unizar.es

José María López Pérez
Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España
chlopez@unizar.es

***Abstract*— En el proceso de innovación de producto tecnológico es tan necesaria la implicación de diversas disciplinas como la *technology literacy* (alfabetización/competencia tecnológica). Los problemas de comunicación derivados de la falta de technology literacy en miembros del equipo dificultan la innovación disruptiva. Se presenta una herramienta metodológica, *Common Understanding Area* (CUA), que se demuestra útil en el ámbito docente; como instrumento individual de aprendizaje; guía de diseño de producto electrónico; recurso para estructurar la información; herramienta de comunicación y toma de decisiones; medio de definición de especificaciones de producto; o guía de evaluación de conceptos. Partiendo de una evaluación de largo recorrido con estudiantes de diferentes grados en ingeniería, se presenta la herramienta metodológica revisada, y asimismo transferida y validada en el ámbito profesional.**

Keywords—metodología, diseño de producto electrónico, trabajo multidisciplinar, x-disciplinaridad.

I. INTRODUCCIÓN

La transgresión de las fronteras entre disciplinas es una de las principales consecuencias que ha traído consigo el progreso de la Sociedad del Conocimiento. La relación entre la ciencia y el mundo real ha sufrido enormes cambios [1], y el auge de las orientaciones transdisciplinares, o de lo que se ha denominado x-disciplinaridad [2] –como concepto abierto que recoge cualquier posible grado de multidisciplinaridad (multi, inter, cross, trans, etc)-, ha sido uno de los más recientes. Para alcanzar una innovación en tecnología es esencial que exista un solapamiento integrador entre mentes divergentes y convergentes [3] y que se aporten a la industria profesionales capaces de trabajar en este tipo de entornos [4].

Sin embargo, en el proceso de diseño de producto o servicio electrónico, los problemas de comunicación derivados de la falta de *technology literacy* (alfabetización/competencia tecnológica) en disciplinas que suelen formar partes de los equipos de innovación de las empresas (electrónica, telecomunicaciones, diseño, márquetin) dificultan la innovación disruptiva y fomentan barreras ya reconocidas en el trabajo x-disciplinar, principalmente la desconsideración y la brecha entre disciplinas.

Según la *International Technology and Engineering Educators Association* (ITEEA), el término *technology literacy* (alfabetización/competencia tecnológica) se define como la capacidad para usar, gestionar, evaluar y entender la tecnología [5]. De acuerdo con [6], la *technology literacy* tiene tres niveles, que de menor a mayor son representados por la habilidad del individuo de: (1) identificar las tecnologías que son relevantes a una tarea determinada; (2) entender cómo se usa la tecnología y la interacción con su(s) interface(s); y (3) comprender el funcionamiento interno de la tecnología. Por su parte, [7] lista cuatro dimensiones en el proceso de aprendizaje crosdisciplinar, que son correlativas: (1) *Islands of Knowledge*, donde el entendimiento se restringe a la propia disciplina; (2) *Awareness*, es decir, la conciencia acerca de la existencia de otras disciplinas con capacidad de complementar la propia; (3) *Appreciation*, que implica un interés activo para entender y contribuir a los objetivos y conceptos de las otras disciplinas; y (4) *Understanding*, donde están ya presentes competencias para negociar, ser proactivo en la discusión y usar el lenguaje de la otra disciplina, así como para aportar los inputs necesarios antes de que estos sean requeridos.

Con todo esto en consideración, se plantea que el desarrollo de dispositivos electrónicos inteligentes requiere el tercer nivel de *technology literacy* de [6], para poder alcanzar el *understanding* de las otras disciplinas, en el sentido que propone [7]. Ante este panorama, se propone una herramienta denominada *Common Understanding Area* (CUA) (Área Común de Entendimiento), que tiene como objetivos principales (1) transmitir una base de conocimiento tecnológico para el diseño de dispositivos inteligentes y (2) servir como herramienta a posteriori durante la vida laboral del alumno (por tanto ser también un recurso profesional).

Partiendo de una evaluación de largo recorrido con estudiantes de diferentes grados en ingeniería, se presenta la herramienta metodológica revisada, y asimismo transferida y validada en el ámbito profesional.

II. METODOLOGÍA

Como estrategia concreta, una formación directa sobre las últimas tecnologías crearía un conocimiento efímero que, sin un ejercicio constante de mantenimiento, quedaría rápidamente obsoleto; sería como ofrecer pescado en lugar de enseñar a pescar. Por tanto, el desarrollo de CUA se basa en la teoría constructivista, por la cual se asume que el conocimiento se construye a partir del que ya existe [8].

El objetivo de la propuesta es crear analogías, vinculando sistemas y realidades bien conocidas con los fundamentos básicos de la tecnología. La Tabla 1 relaciona las preguntas de alto nivel que un profesional tiene que entender para diseñar correctamente un producto electrónico, con el conocimiento existente que se usa con la orientación constructivista. Estos son los cuatro pilares a partir de los cuales se construye *Common Understanding Area*, pudiéndose considerar como subáreas

para usar de forma ordenada –es decir, como fases de un proceso de diseño–, o bien como espacios independientes que ocupar –dependiendo de las características del equipo, de la fase y del tipo de proyecto–. Cada subárea viene formalizada por una introducción conceptual constructivista apoyada en una infografía, junto una herramienta en forma de tabla, en la que se propone a los estudiantes que completen la información necesaria para sus proyectos. Estos recursos son el principal medio de diálogo entre disciplinas.

TABLA 1. FUNDAMENTOS CONSTRUCTIVISTAS

PREGUNTAS DE ALTO NIVEL	CONOCIMIENTO EXISTENTE	TECHNOLOGY LITERACY ADQUIRIDA
¿Cómo interactúan los dispositivos electrónicos con las personas y su entorno?	Pirámide del conocimiento de Ackoff	Funcionalidad y comportamiento de los dispositivos electrónicos
¿De qué se componen los dispositivos electrónicos?	Sentidos humanos	Arquitectura de dispositivo electrónico
¿De dónde viene la energía y cómo la consumen los dispositivos?	Vehículo y combustible	Restricciones energéticas de los dispositivos electrónicos
¿Cómo mandan y reciben la información los dispositivos?	Comunicaciones humanas	Comunicaciones electrónicas

A. De la pirámide del conocimiento a la funcionalidad

Los dispositivos electrónicos inteligentes son los componentes básicos de una clase superior de conceptos tales como los entornos inteligentes, la inteligencia ambiental o el Internet de las Cosas.

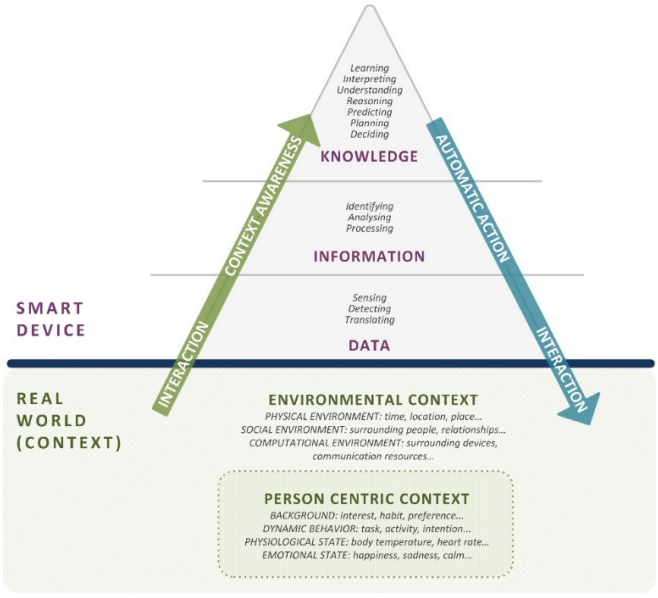


Figura 1. Funcionalidad del sistema

La Figura 1 proporciona una instantánea que integra la visión de (1) un dispositivo inteligente, (2) el mundo real –categorización contextual–, y (3) la relación jerárquica de [9] entre datos, información y conocimiento, todo ello aplicado al tema que nos ocupa. La pirámide de Ackoff [9] constituye un recurso gráfico muy conveniente para representar estos tres conceptos, por su sencillez, su fácil adaptabilidad a cualquier entorno y la universalidad de su estructura, comprensible por cualquier disciplina; por eso puede usarse como una herramienta x-disciplinar muy efectiva, adecuándola oportunamente a cada tema. La versión de la pirámide para nuestra metodología aporta una visión de los procesos internos que se producen dentro de un dispositivo electrónico para dar lugar a las ventajas de las que disfruta el usuario. Esto se plantea como un primer paso a través del cual el alumno comienza a adquirir la conciencia de que internamente existe una lógica muy asequible a nivel conceptual, que puede asimilarse también con el proceso de pensamiento humano.

La Tabla 2 es la materialización práctica de la teoría desarrollada en torno a la pirámide, y que se transmite a los alumnos como herramienta para ser utilizada en el proceso de diseño del producto electrónico. Para facilitar su asimilación (en esta y en el resto de fases o áreas), se proporciona a los alumnos una tabla ya completada.

TABLA 2. GUÍA DE DISEÑO: FUNCIONALIDAD DEL PRODUCTO ELECTRÓNICO

AMBIT	REAL WORLD –PERSONAL CONTEXT	REAL WORLD – ENVIRONMENTAL CONTEXT
Data captured, detected or sensed from the real world		
Information identified (from data processing and analysis)		
Knowledge extracted (from learning and interpretation of information)		
Knowledge applied to real world (reasoning, predicting, planning from extracted knowledge)		

B. De los sentidos a la arquitectura de bloques

Tras estudiar la filosofía y la lógica de funcionamiento, es necesario entender la parte tangible del dispositivo electrónico, aprendiendo su estructura interna. Los dispositivos electrónicos inteligentes suelen realizar algún tipo de función en contacto con el usuario y el contexto, incluir comunicación –normalmente inalámbrica– y tener una identidad en Internet [10]. La infografía de esta parte (Figura 2) presenta los bloques de construcción habituales de un dispositivo electrónico, cuya presencia varía en función de las características del producto. A partir de estos fundamentos, se ejemplifican arquitecturas, más o menos complejas en la Tabla 3.

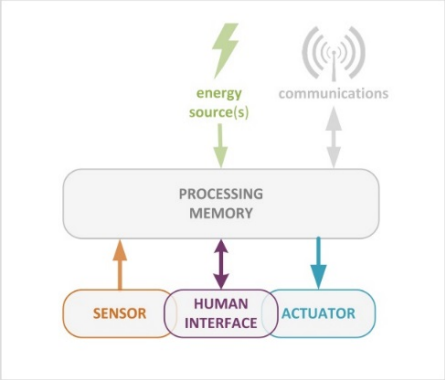


Figura 2. Arquitectura del dispositivo electrónico inteligente

Desde la perspectiva x-disciplinar, la codificación que se considera más adecuada para facilitar la comprensión es una doble clasificación basada en las capacidades y las restricciones de los dispositivos: Las capacidades de un dispositivo se relacionan en la teoría correspondiente a esta parte con los tres paradigmas de la Figura 1 –sensibilidad al contexto, acción automática e interacción con el usuario– y con las tres funciones intrínsecas –sensado, actuación, interacción–. Las restricciones de un dispositivo se relacionan principalmente con la energía, la computación y las comunicaciones, y permiten clasificar los dispositivos en mote, mobile o static (Tabla 3).

Tomando la Tabla 3 como soporte teórico, se propone el uso de la Tabla 4 como guía en el diseño de la arquitectura y bloques de un dispositivo. En cursiva aparecen las notas de apoyo que se añaden para facilitar la cumplimentación por parte del alumno.

TABLA 3. COMPARACIÓN ENTRE DISPOSITIVOS DE TIPO MOTE, MOBILE Y STATIC

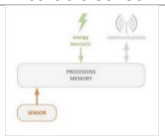
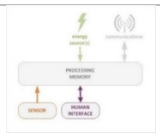
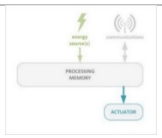
	MOTE	MOBILE	STATIC
Size	Small	Any	Any
Mobility	Portable or Stationary	Portable	Stationary
Power consumption	Minimum	Low	Any
Power source	Battery or energy harvesting	Rechargeable battery	Mains powered
Lifetime	Months-years	Days	As long as power exists
Computational capacity	Reduced; implement one or few simple functionalities	Medium-high; implement services and complex functionalities	Any
Communic.	Short-medium range; low power; low data rate	Medium-long range; medium power; high data rate	Any
Example	Environmental sensor network, wearable sensor	Mobile phone, tablet	Light or motor controller
Example's architecture			

TABLA 4. BLOQUES DEL PRODUCTO ELECTRÓNICO

	INSTRUCTIONS
Architecture	*Draw building blocks*
Dimensions and weight	*Define approximately shape, dImensions, weight and other physical characteristics of the whole device*
Energy sources and expected lifetime	*Define approximately*
Communications	*Define the basic features that are needed (range, data throughput, topology, etc.)*
Type of sensors	*If included, what kind, where they will go, how they should perform*
Human Computer Interface	*Quote basic features*
Actuator	*If included, what kind, where they will go, how they should perform*
Processing and memory	*If needed; specify for what they are needed*

Una alternativa que facilita el trabajo en equipo y la fluidez creativa, es usar como checklist la tabla 4 y como base de representación la figura 2. El uso de este recurso se puede ejecutar tal como se muestra en la figura 3, pero también a modo de dinámica con posits (en este caso la figura 2 se sitúa en el centro y los miembros del equipo colocan posits, alrededor de la figura, con el contenido que indica la tabla 4).

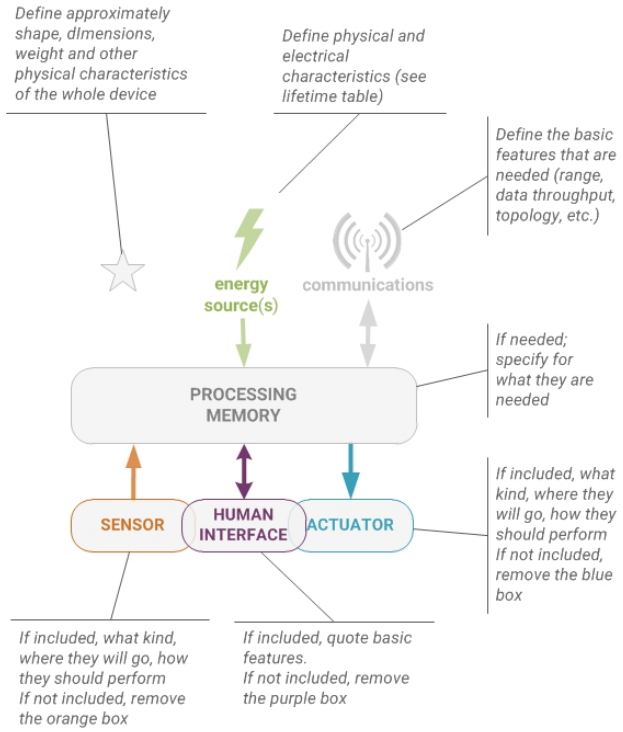


Figura 3. Definición de la arquitectura de bloques

Tanto la infografía como las fichas son herramientas de gran utilidad en la fase de generación de conceptos, en el momento de someter a valoración varias alternativas, con el fin de elegir

el concepto final. En este paso, el hecho de generar una arquitectura de bloques y su correspondiente tabla ayuda a desarrollar el análisis funcional de cada concepto. Además, mediante la comparativa de las tablas resultantes, es posible analizar la viabilidad tecnológica de cada uno de ellos, adquiriendo en este caso un uso de herramienta de validación y de toma de decisiones. La acción evaluativa puede complementar o preceder las técnicas de evaluación habituales para la elección del concepto final que se llevan a cabo con el cliente o con usuarios finales. Este uso de análisis y evaluación de concepto se propone también para el resto de las tablas que componen CUA.

C. *Del combustible de un vehículo a la energía de un dispositivo electrónico.*

La vida útil de un dispositivo electrónico es una de las características que motiva más significativamente su éxito o fracaso en el mercado y algo que otras disciplinas no suelen tener en consideración. Para desarrollar un diseño eficaz, es esencial (1) comprender las implicaciones que cada decisión de diseño tiene en el rendimiento energético, y viceversa, (2) comprender las limitaciones energéticas que deben ser consideradas desde el principio en el proceso de diseño.

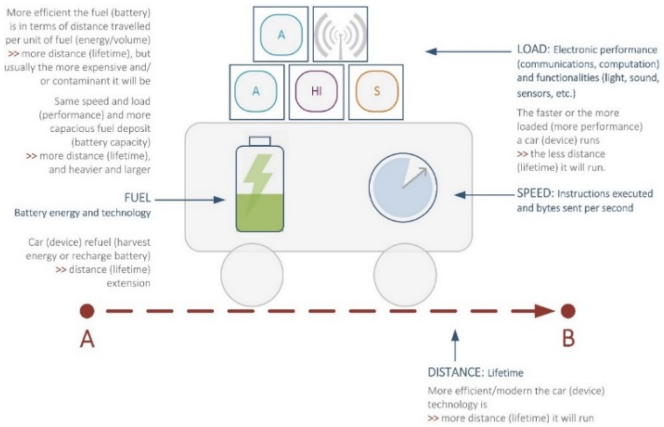


Figura 4. Metáfora de la vida útil para dispositivos electrónicos

En este caso, la infografía que acompaña a la teoría de CUA establece una analogía con un vehículo (Figura 4). Para su implementación, se proporcionan asimismo a los alumnos tablas con cifras relativas a la energía disponible para cada uno de los principales tipos de fuentes de energía; y relativas a la potencia y energía requerida por cada uno de los bloques típicos de un dispositivo electrónico inteligente. En la figura 5 se puede ver un ejemplo de aplicación.

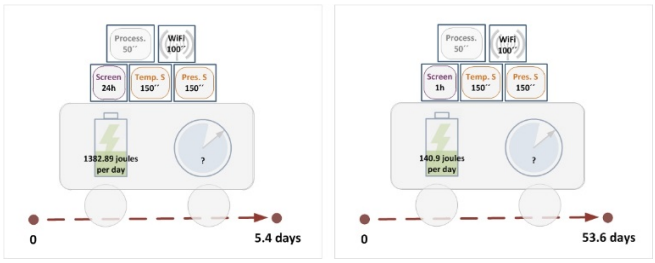


Figura 5. Ejemplo de aplicación

En la práctica, una vez que los bloques electrónicos han sido identificados en el paso anterior, la siguiente acción consiste en completar para cada bloque la Tabla 5. Finalmente, se realizan cálculos matemáticos que permiten estimar la vida del dispositivo.

TABLA 5. TABLA DE VIDA DEL DISPOSITIVO

	Running power	Time in use per day	Energy required per day
Wireless communication			
Data processing			
Screen			
Sensors (temperature, presence)			
Standby (except screen)			
Total			
Lifetime (battery capacity)			

D. *De las comunicaciones humanas a la comunicación electrónica*

Actualmente las comunicaciones son esenciales, ya que los dispositivos electrónicos cada vez tienen más necesidades de comunicarse entre sí y con Internet. Para transmitir la idea de que dos dispositivos han de compartir todas las capas del modelo ISO / OSI [11] se recurre a una analogía entre la comunicación humana y las comunicaciones electrónicas, que se ilustra en la tabla 6.

TABLA 6. ANALOGÍA ENTRE LAS COMUNICACIONES HUMANAS Y LAS COMUNICACIONES ELECTRÓNICAS

HUMAN COMMUNICATION	ISO/OSI LAYERS	ELECTRONIC COMMUNICATION
Words form sentences providing meaning Communication problem: Two persons who don't understand each other. E.g. Question: What time is it? Answer: it is red.	7. APPLICATION	Serves as an interface between applications of nodes in the network Communication problem: node receives messages that are not applicable to its application; e.g., a temperature sensor receives a message asking for humidity value
Phonemes and letters form words Communication problem: Two persons speaking different languages	6. PRESENTATION	Focus on the presentation of data from data link layer in order to provide understandable information Communication problem: node receives messages that are not understood
Build a conversation among three people while avoiding interruptions Communication problem: two persons talking at the same time	3. NETWORK 4. TRANSPORT 5. SESSION	Guarantee node's access to the network, ensuring that messages reach destination and building relationships between nodes in network Communication problem: messages not reaching receiver due to high data traffic or message routing problems
Sound from phonemes, strokes of letters Communication problem: bad handwriting or vocalisation	2. DATA LINK	Manage the data flow in and out of a node, ensuring common format of data messages Communication problem: data misinterpretation due to insufficiently strong RF signal
Physical link between people Examples: acoustic waves from speaker to listener; a written message on paper; non-verbal language (hand-eye) Communication problem: I cannot hear your voice because I'm deaf or because you talk too quietly	1. PHYSICAL	Ensures physical connection between nodes Examples: radiofrequency, infrared, cabled Communication problem: Infrared remote cannot command a radiofrequency automatic door

Además de entender cómo funcionan las comunicaciones electrónicas, para asegurar la factibilidad del concepto de producto los profesionales implicados en el proyecto deben conocer las limitaciones y características esenciales de los principales estándares de comunicaciones y saber cómo dichas características pueden influir en el diseño. También en este caso la comunicación humana sirve como inspiración y ejemplo (Tabla 7).

Como material de apoyo a los alumnos, se proporciona asimismo una tabla donde se muestran las características previamente expuestas en el contexto de los estándares de comunicación más comunes.

TABLA 7. ANALOGÍA ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS COMUNICACIONES ELECTRÓNICAS Y HUMANAS

Comunicaciones electrónicas	Comunicaciones humanas
Rango	Desde un susuro a un grito
Ancho de banda	Desde un SMS a un correo electrónico
Topología	Desde una conversación uno-a-uno a una reunión de amigos
Demanda energética	Desde un saludo a una master class

Para facilitar el proceso de toma de decisiones de diseño en cualquiera de las sub-areas de CUA, se propone combinar las tablas con herramientas de tipo más cualitativo, como los mapas radiales o radar charts [12]. Para cada concepto o alternativa de diseño, se seleccionan una serie de dimensiones de producto. Dichas dimensiones se pueden extraer de cualquier tabla de CUA o proponer nuevas, seleccionando siempre aquellas que representen a las principales especificaciones del proyecto. El peso de cada dimensión se puntúa para componer varios gráficos (uno por concepto), que se pueden superponer y comparar. En caso de trabajo en grupo, las valoraciones se pueden otorgar individualmente, para posteriormente suscitar el debate en grupo. En la figura 6 se muestra un ejemplo de aplicación realizado con livegap.com.

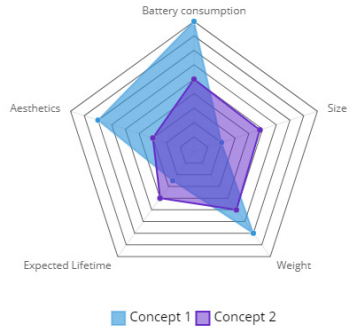


Figura 6. Ejemplo de radar chart con dos alternativas de diseño.

III. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para evaluar la eficacia de CUA se ha llevado a cabo una evaluación de largo recorrido, planteada en sucesivas iteraciones que han llevado la herramienta desde el mundo académico al profesional. Las primeras iteraciones del enfoque se llevaron a cabo, en profundidad creciente, en proyectos colaborativos con estudiantes de la Universidad de Zaragoza, implicando diferentes grados y másteres de ingeniería: grado de diseño industrial y desarrollo de producto junto con grado de electrónica [13][14]; y posteriormente de forma más detallada en máster de diseño industrial junto con cliente; máster de diseño industrial junto con grado de telecomunicaciones; grado de telecomunicaciones junto con cliente; proyectandos de fin de grado del grado de diseño industrial y desarrollo de producto; proyectandos del máster de diseño industrial y desarrollo de producto; proyectandos del grado en ingeniería electrónica y comunicaciones. Asimismo CUA se ha aplicado en diferentes proyectos de investigación x-disciplinares.

Todas estas iteraciones han seguido una estrategia de evaluación mixta cuantitativa y cualitativa, que ha considerado e incluido la perspectiva de estudiantes y profesores, ambos como usuarios de la herramienta metodológica y los segundos también como *proxies*. Las sucesivas metodologías de evaluación han incluido diferentes instrumentos evaluativos:

- Observaciones acerca del comportamiento de estudiantes y de los grupos, registrada mediante notas de campo;

- Evaluaciones de la calidad de los productos ideados, tanto en términos generales como en relación con su viabilidad tecnológica e innovación;
- Comparativas de la evolución de las calificaciones;
- Cuestionarios semiestructurados pasados individualmente a los estudiantes, con el fin de obtener su feedback acerca de su valoración de los beneficios obtenidos y de la percepción de los objetivos intangibles;
- *Focus group* y entrevistas semiestructuradas con los equipos de estudiantes, con el objetivo de profundizar ciertos resultados de las encuestas y de explorar aspectos relacionados con el trabajo diario de cada grupo.
- Trabajo guiado con proyectandos vs. trabajo sin guía con proyectandos.
- Entrevistas personalizadas con los proyectandos.
- Evaluaciones por parte de los profesores y directores de proyecto de los estudiantes.
- Evaluaciones de profesionales.

El estudio de los individuos y grupos de diferentes disciplinas permite corroborar que, aunque ingenierías todas y destinadas a colaborar, reproducen conflictos similares a los que arroja la literatura especializada en x-disciplinaridad. Los puntos de fricción y barreras más habituales son:

- Dificultades de comunicación entre disciplinas, no solo debido a las jergas, y formas de transmitir y de representar las ideas sino también por el diferente ritmo y metodología de trabajo al que están acostumbrados.
- Dificultad de conjugar perspectivas, derivado precisamente de la formación "centrada en la disciplina" que ambos grados reciben, los electrónicos ven el diseño como la carcasa que envuelve "su obra" y los diseñadores ven la electrónica como "las tripas" de "su obra".
- Desvalorización de la disciplina contraria, principalmente por la asimilación de prejuicios históricos entre ingenierías.
- Diferentes intereses y perspectivas con respecto del producto.
- Diferentes motivaciones y responsabilidades, en algunos casos desbalanceadas a nivel disciplinar.

Los resultados tras los primeros años de experimentación, dentro de asignaturas colaborativas específicas, habían evidenciado cómo la metodología y el uso de las herramientas constructivistas mejoran la *technology literacy* de los diseñadores y cómo esto sirve de base sólida para el diálogo entre diseñadores y electrónicos. La metodología ataca tres flancos de la relación entre disciplinas: (1) con el aprendizaje de ciertas bases de la electrónica, los diseñadores superan sus limitaciones y adquieren una voz activa en el proceso de diseño conjunto, siendo capaces de negociar especificaciones y restricciones gracias a su mejor comprensión del medio; (2) los recursos gráficos proporcionados establecen un medio a través del cual se promueve el lenguaje común efectivo entre los dos *object worlds* [15], dando también lugar a usos emergentes de CUA que le otorgan mayor valor; (3) en consecuencia, aumenta bilateralmente el respeto entre disciplinas, mejorando las actitudes hacia la disciplina contraria y produciéndose progresivamente una evolución desde las *islands of knowledge* hasta el *shared understanding*, que pasa por etapas intermedias de *awareness* y *appreciation*. Los beneficios también revierten en el desempeño grupal, reflejado por un lado en la calidad de los productos desarrollados, con una considerable reducción de errores y una mejora evidente en las capacidades tecnológicas de los dispositivos; y también en el rendimiento de los estudiantes.

La última evaluación de CUA ha tenido lugar en dos líneas: por un lado la puesta en marcha de la metodología "sin guía del profesor". Esta acción ha tenido lugar en proyectos de fin de grado y máster, con el objetivo de comprobar si la herramienta podía usarse de forma independiente y constituir un recurso autoformativo. En este caso segmentamos los resultados según el conocimiento previo en electrónica. En el caso de estudiantes sin conocimiento de electrónica previo, la herramienta no se usa fluidamente cuando se hace de forma independiente, sin la aportación teórica que acompañaba su aplicación dentro de asignaturas específicas. Aunque les resulta útil en términos generales y la valoración es alta, la mayoría de estudiantes tienen dificultades para completar las tablas. El uso, sin embargo, mejora ostensible e incrementalmente con las siguientes acciones, ordenadas de menos a más: proporcionando al proyectando un texto escrito con la teoría; asistiendo al alumno individualmente de forma teórica y práctica (esta opción tiene la desventaja de la viabilidad para un solo director de proyecto); uniendo el trabajo de dos proyectandos de diferentes disciplinas, una de ellas electrónica o afín. Esto es un claro indicador de que la colaboración x-disciplinar no es prescindible en el mundo real y el hecho es que la gran mayoría de los estudiantes valoran positivamente el uso de la herramienta en colaboración. Los resultados en estos casos coinciden plenamente con los datos previos llevados a cabo en asignaturas de grado, por lo que se valida de nuevo el potencial de la herramienta como medio de trabajo x-disciplinar para la innovación TIC. Uno de los usos comunes en este sentido fue la de rellenar de forma iterativa las tablas y utilizar los esquemas al mismo tiempo que se desarrollaban conjuntamente los conceptos; durante el trabajo de conceptualización utilizaban las tablas o los diagramas para discutir acerca de la viabilidad de una idea para explicarnos por qué una idea era inviable: "Discutíamos sobre ello y proponíamos cambios… Evolucionamos todos nuestros conceptos de esta manera".

En el caso de estudiantes con conocimiento previo medio o alto de electrónica, se produce una revelación inesperada. La aceptación de la herramienta en principio se preveía menor, dado que se trataba de proyectandos que ya habían seguido todas las asignaturas del grado, y algunos de los contenidos de la herramienta podrían parecer elementales. Sin embargo hacen una valoración alta, apreciando su utilidad para estructurar la información, como una guía para ayudar a organizar y "aclarar las ideas antes de profundizar en el desarrollo, como los

diagramas de flujo en programación", o para "resumir todo lo relacionado con la electrónica"

La segunda línea de experimentación ha consistido en probar CUA en un entorno no formativo. Su uso ha sido validado en un proyecto de investigación real, en concreto el Proyecto Sigue-Tu –Sistema Inteligente de Gestión de Emergencias en Túneles-, cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) de la Unión Europea y por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) del Gobierno de España en su Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016 (código RTC-2015-3359-4). El uso de la herramienta en este contexto valida su uso libre sin guía, tanto por un tándem entre un diseñador y un electrónico como por grupos de electrónicos sin diseñador. Los resultados de esta aplicación han aparecido reflejados en publicaciones [10] y derivado asimismo en un modelo de utilidad (Ref: 201230980/1) y una patente (Ref: WO 2015055877).

Teniendo en cuenta a [16], este trabajo completa el marco de validación de [17], confirmando la *theoretical performance validity* de la metodología propuesta.

IV. Conclusiones

En la era de *Internet of Things*, la industria y la investigación han de responder a una realidad plural que demanda productos basados en el avance tecnológico, unido a nuevos significados, usos e interacción entre humanos y tecnología. Este contexto demanda colaboraciones realmente x-disciplinares; sin embargo, se percibe que el *shared understanding* es limitado entre disciplinas y que es necesario un marco común de trabajo donde los desarrolladores sean conscientes de lo mucho que sus decisiones afectan a la relación usuario-producto y donde los profesionales más asociados al usuario (diseño, marketing, etc.) entiendan las restricciones y potenciales asociados a las tecnologías. De esta reflexión se evidencia la urgencia por plantear estrategias formativas específicas y se propone CUA como una nueva metodología para el diseño x-disciplinar de dispositivos electrónicos.

Las sucesivas experiencias evaluativas que se han desarrollado en torno a CUA validan la utilidad de la metodología para el diseño de productos electrónicos inteligentes, pero también para trabajar fluidamente con otras disciplinas y para aumentar las competencias transversales de los miembros del equipo.

La metodología se demuestra útil en el ámbito docente, reconociéndose como un instrumento individual de aprendizaje; una guía de diseño de producto electrónico; un recurso para estructurar la información; una herramienta de comunicación y toma de decisiones en entornos x-disciplinares; una herramienta de discusión y definición de especificaciones de producto; o una herramienta de evaluación de conceptos. Estas capacidades hacen que la herramienta trascienda los límites académicos, dando resultados asimismo en varios proyectos de investigación. Su aplicación en el mundo profesional hace ver asimismo el valor de la metodología como herramienta profesional de diseño, como guía que puede ser utilizada por equipos mixtos x-disciplinares o bien por el profesional individual involucrado en el diseño de producto electrónico. Se puede destacar el potencial de los recursos físicos de CUA, tanto las tablas como las infografías.

La evaluación llevada a cabo cubre tres de las cuatro dimensiones de la evaluación de metodologías propuesta por [15]: *theoretical structural validity, empirical structural validity, empirical performance validity* y *theoretical performance validity.*

Agradecimientos

A todos los estudiantes, profesores y profesionales que han usado y validado CUA. Al Vicerrectorado de Política Académica de la Universidad de Zaragoza por su apoyo a través de las sucesivas convocatorias de proyectos de innovación docente. Al Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) del Gobierno de España y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) de la Unión Europea, cofinanciadores de uno de los proyectos donde se implantó CUA.

Referencias

[1] Hadorn, G. H., et al. (2008). *The emergence of transdisciplinarity as a form of research* (pp. 19-39). Springer Netherlands

[2] Blanco, T. (2016). Metodologías de diseño como plataforma para la x-disciplinaridad en proyectos tecnológicos: surfing disciplines (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).

[3] Onarheim, B., & Friis-Olivarius, M. (2013). Applying the neuroscience of creativity to creativity training. *Frontiers in human neuroscience*, *7*

[4] Tulsi, P. K., & Poonia, M. P. (2015). Expectations of Industry from Technical Graduates: Implications for Curriculum and Instructional Processes. Journal of Engineering Education Transformations, 19-24.

[5] International Technology Education Association. (2000). *Standards for technological literacy: Content for the study of technology*. Reston, VA: International Technology Education Association.

[6] Moore, D. R. (2011). Technology literacy: the extension of cognition. *International Journal of Technology and Design Education*, *21*(2), 185-193

[7] Fruchter, R. (2001). Dimensions of teamwork education. *International Journal of Engineering Education*, *17*(4/5), 426-430.

[8] Tempelman, E., & Pilot, A. (2011). Strengthening the link between theory and practice in teaching design engineering: an empirical study on a new approach. *International Journal of Technology and Design Education*, *21*(3), 261-275

[9] Ackoff, R. L. (1989). From data to wisdom: Presidential address to ISGSR, June 1988. *Journal of applied systems analysis*, *16*(1), 3-9.

[10] Asensio, Á., Blanco, T., Blasco, R., Marco, Á., & Casas, R. (2015). Managing emergency situations in the smart city: The smart signal. *Sensors*, 15(6), 14370-14396.

[11] IOS/IEO Commission (1994). ISO/IEC 7498-1: 1994. *Information technology–Open systems interconnection–Basic reference model: The basic model*.

[12] Nancy R. Tague. (2005). *The quality toolbox*. Asq Press

[13] Blanco, T., Casas, R., Manchado-Pérez, E., Asensio, Á., & López-Pérez, J. M. (2017). From the islands of knowledge to a shared understanding: interdisciplinarity and technology literacy for innovation in smart electronic product design. *International Journal of Technology and Design Education*, 27(2), 329-362.

[14] Manchado, E.; Romero, C.; Blanco, T.; Casas, R.; López, J.M. "Una experiencia de aprendizaje colaborativo basada en la adaptación de metodologías de Design Thinking". En: *Actas del IV Congreso Internacional Sobre Aprendizaje, Innovación y Competitividad*. pp. 434 - 439. 2015. ISBN 978-84-608-2907-2.

[15] Bucciarelli, L. L. (1999). Design delta design: Seeing/seeing as. In *Design Thinking research symposium* (Vol. 4, pp. 23-25)

[16] Yin, R. K. (1994). *Case study research: Design and methods*. Sage publications

[17] Pedersen, K., Emblemsvag, J., Bailey, R., Allen, J. K., & Mistree, F. (2000, September). Validating design methods and research: the validation square. In *ASME Design Theory and Methodology Conference*.

Challenge based education: an approach to innovation through multidisciplinary teams of students using Design Thinking

Guido Charosky, Luciana Leveratto
IED, Istituto Europeo di Design
Barcelona, Spain
g.charosky@drop-innovation.com,
luciana@lucianaleveratto.com

Lotta Hassi, Kyriaki Papageorgiou
ESADE Business School
Universitat Ramon Llull
Barcelona, Spain
lotta.hassi@esade.edu, kyriaki.papageorgiou@esade.edu

Juan Ramos-Castro, Ramon Bragós
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació
UPC, Universitat Politècnica de Catalunya
Barcelona, Spain
juan.jose.ramos@upc.edu, ramon.bragos@upc.edu

***Abstract*— This work aims to describe and discuss the benefits and learning outcomes detected along four iterations of a learning experience carried out by three institutions: ESADE Business School, IED Istituto Europeo di Design and the Telecom Engineering School of UPC, Universitat Politècnica de Catalunya. Mixed teams of students from the three institutions face open innovation challenges with societal interest through Design Thinking. This study is focused on the learning outcomes of engineering students, compared to the ones obtained by Telecom engineering students that follow standard project-based courses. The students spend 3-4 weeks at IdeaSquare, a creative environment created at CERN Meyrin site in Switzerland, where they can consult and interact with scientists and knowledge transfer experts about possible applications and uses of CERN technologies in the student's proposed solutions. One example of a prototyped solution is a low-cost sensor-based system to detect malfunction in water wells in Africa, which uses SMS-based communication and cloud-based solutions to manage wells repairs. As a result, the ICT engineering students increase their awareness of user needs and the relevance of the problems to focus on when tackling a complex challenge. They also increase their ability to ideate more disruptive and high-impact solutions thanks to their understanding of the "big picture" based on their interactions with design and business students.**

Keywords*— *challenge based education; multidisciplinary teams; design thinking; innovation

I. INTRODUCTION

Innovation is not only about technology or technical solutions to problems, either business, market or industry based. Innovation is about solving complex challenges and developing solutions to these challenges tackling them from three perspectives: business, technology and people.

Every discipline involved in the innovation process is fundamental and a deep knowledge in engineering (technology), management (business) and design (people) is needed to develop solutions that have greater chances to succeed in the market.

As a society we are facing extremely complex challenges today and in the near future like water scarcity, climate change, over population, immigration and refugees, among others. To tackle this type of challenges, solutions must be holistic and the approach must be in multiple directions.

Training future professionals in the processes and methods to innovate and in understanding how to tackle this type of challenges from a multidisciplinary perspective could increase the chances to have solutions with greater chances to succeed.

For engineering students, getting to understand the innovation process, working in multidisciplinary teams with management and design students and approaching solutions beyond the purely technical or engineering perspective makes a great difference in their learning experience.

These types of complex challenges pose unforeseeable uncertainty [1] and require different approaches than "traditional" engineering projects. Design Thinking is a human centric innovation approach to innovation [2] suitable to deal with uncertainty in the early phases of projects through in depth user research, ideation and early prototyping and testing of solutions in an iterative process.

Based on Dym's research [3] using Design Thinking in project-based learning is the best pedagogical model for teaching design.

Challenge Based Innovation (CBI) is a program created by CERN to host educational projects where students from different disciplines working in multidisciplinary teams tackle innovation challenges through Design Thinking. The objective is to design solutions to complex social problems, considering the use of CERN technologies if suitable.

The objective of this paper is to describe the process, methodology and learning outcomes (focusing on engineering students) and examples of the technical solutions and prototypes as result of this new educational experience carried out by three higher education institutions: UPC (Telecom and Computer Science students), the business school ESADE and the Barcelona site of IED, Istituto Europeo di Design, after four editions of this course.

The methods and results are compared with the ones developed by a more classical approach: the capstone project that is carried out in the fourth year of the Telecom Engineering degree. In this case, challenges are also stated by external companies or institutions but are basically technical challenges, which have initial requirements and even specifications.

II. Design Thinking

According to Tim Brown, "Design thinking is a human-centered approach to innovation that draws from the designer's toolkit to integrate the needs of people, the possibilities of technology, and the requirements for business success" [2].

In the past decade, Design Thinking arisen as an innovation methodology to tackle complex problems, also beyond business or commercial environments. It is not a new phenomenon, as design professionals have been working with this processes and methods for many decades. What is rather new is using Design Thinking as a universal tool for problem solving and innovation in other fields than design, like management.

This approach brings together and balances what it is desirable (what people needs), viable (economically sustainable from the business point of view) and feasible (from the technology perspective).

The principles of Design Thinking are: Human-Centered, Collaborative, Iterative, Holistic and Experiential.

These principles emphasize the observation of people behaviors to detect needs and opportunities, collaboration in multidisciplinary teams, early visualization and rapid prototyping of ideas and solutions and testing in an iterative process. It does not replace professional design or engineering. It is a methodology for early stages of the innovation funnel [4].

Within the Design Thinking process we can clearly identify two different "spaces" to explore: the problem space and the solution space. Within the problem space, the focus is placed in understanding the challenge, the context, the user/s and stakeholders and detecting needs to be solved and opportunities. In the solution space, the aim is to generate multiple ideas and solutions to the specific needs and opportunities identified in the previous phase. These solutions are then prototyped and tested in an iterative process to learn and improve before developing the final solution.

From the cognitive perspective, it combines divergence and convergence processes to generate several choices and only then make choices between the alternative options [2].

According to [5] it is a process composed of 6 iterative phases where back and forth movements are involved between the different phases (Figure 1)

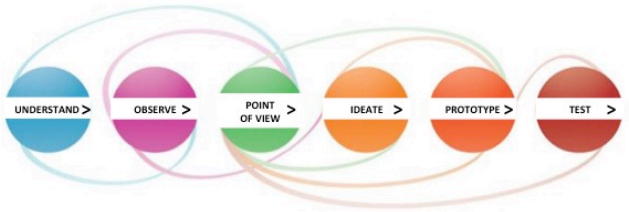


Fig. 1. Steps in a Design Thinking process . Adapted from [5].

The six phases are Understand, Observe, Point of View, Ideate, Prototype and Test. The first three phases belong to the problem space and the last three to the solution space. They will be developed through an example in section V.

III. Challenge Based Innovation (CBI) at CERN

A. *IdeaSquare @ CERN*

The European Organization for Nuclear Research, CERN, is dedicated to fundamental research in particle physics since 1954. According to CERN website "physicists and engineers are probing the fundamental structure of the universe. They use the world's largest and most complex scientific instruments to study the basic constituents of matter – the fundamental particles". In order to do this, they develop very specific and complex technologies. These technologies are purpose-built particle accelerators and detectors, which are instruments scientists use to observe and record the results of their experiments (collisions of particles).

More than 12.000 scientists from all over the world collaborate with CERN in these scientific experiments and developing new hardware and software. The technologies they develop for their experiments could have great potential applications and impact in the society. Some of them even can change our lives, like the case of the World Wide Web, invented by Tim Berners-Lee in 1989 at CERN. To find ways to allow, facilitate or accelerate the process of discovering societal applications for CERN technologies, a new experiment called IdeaSquare was created in 2013 in

collaboration with Aalto Design Factory, which is a multidisciplinary teaching and development unit from Aalto University.

The objective of IdeaSquare is to prove or demonstrate that applying fundamental research concepts to tackle societal challenges is of value. For this purpose, IdeaSquare hosts different activities: long-term research projects on detector R&D, different innovation-related events and hackatons and multidisciplinary university projects like CBI (Challenge Based Innovation) [6]. Challenge Based Innovation is a human-centric experimental project hosted by IdeaSquare where multidisciplinary teams of students tackle societal challenges. Within these wide challenges, they identify end-user needs to be addressed. In collaboration with CERN mentors and coaches from their home Universities, they ideate and create tangible prototypes of the solutions inspired in relevant novel technologies from CERN.

To achieve better synergies and connections with CERN all student teams have a CERN mentor who helps them and guides them in everything related to technologies from this research institution. Also, the students have weekly working sessions with their coaches from their home institutions to progress in their projects.

B. CBI Course Structure

Similar to the four phases of the Double Diamond design process from the Design Council [7], which is based in the Design Thinking methodology, the basic structure of CBI is composed of three main blocks: Discover, Design and Deliver.

In the initial Discover phase, the teams focus on deep diving into their challenges, understanding the context, trends, benchmarking, needfinding, doing basic research and user research (observation, interviews, etc). At the end of this phase the teams define the specific need or problem they are going to tackle within the original challenge. In the Design phase the students generate multiple ideas and solutions to the problem that are prototyped in low resolution (cardboard, paper, etc) to quickly iterate and learn through user testing. After these iterations, one solution is chosen to be further developed and prototyped with higher resolution. In the Delivery phase, the selected idea is prototyped to a proof of concept level and the solution is developed from the technical, design and business model perspective. At the end of the project, all teams present their solutions and prototypes in a gala event at CERN in front of scientists and universities audience, with media coverage.

Ideally the societal challenges for the course are defined in collaboration with NGOs or companies, and with IdeaSquare team. The topics of the challenges are broad and allow multiple ways to approach them, aiming for educational and learning outcomes rather the technical solutions of the projects. In the two last editions, alignment with UN Sustainable Development Goals (SDG) has been taken into account when defining the challenges.

Teams are usually formed by six students (two from MBA, two from engineering and two from design). In a few cases, some teams had only one representative of one of the institutions. In several cases, they have been added to mixed student teams from other international universities also involved in the Aalto Global Design Factory Network.

The schedule and practical arrangements of the course has been adapted year by year. The course itself is a prototype. In the current setup, there is a kick-off period, with an initial intensive week in one of the local institutions followed by a 3-5 days at IdeaSquare@CERN. Then, there is a weekly full day (8 hours) devoted to the projects in one of the local institutions along 5 weeks, followed by an intensive week 3-5 days at IdeaSquare@CERN where the ideation phase is finished in most cases. Then another set of 5 weekly days at one of the local institutions, devoted to converging in one solution and designing it and a final intensive period of 10 days at IdeaSquare@CERN for solution integration and final presentation.

Each team at the end of the project must deliver the following items:

- Prototype of the solution (proof-of-concept)
- User testing feedback
- Demonstration of the impact of their solution
- Clear description of their link to CERN
- Final project presentation
- Well-documented project and process description
- Project video

According to the CBI Student Guidelines document, shared by the three institutions, the course learning outcomes are:

- Develop an Advanced Design project applying a methodology focused in product innovation.
- Study and guide the creation of future scenarios, based on a deep analysis of present and past, with the aim of creating new ideas applicable to the new context.
- Analyze the project considering market, society and technology, to define clear areas for new opportunities.
- Achieve the proper presentation tools to present and explain the design process, both orally and in digital format.
- Apply a strategy, making decisions for achieving innovation and quality.
- Fundament the concepts in a multidisciplinary project from a theoretical and practical perspective.

- Present and represent design ideas applying the proper techniques.
- Apply the proper digital technology for the communication and presentation of projects.
- Implement specific design research and experimentation techniques.
- Find out and study the productive processes for the fabrication of the designed projects.

The assessment of the individual students is based in the team performance (50%), the individual performance (35%) and the peer assessment (15%). The first two marks include several aspects specified in a rubric. Taking into account that the teams have, at least, a weekly coaching hour with several faculty members, we can use authentic assessment.

Feedback about the course is obtained through a specific feedback session with all students and faculty members, an individual reflection document and several questionnaires supplied by the different institutions.

IV. Capstone project at the Telecom Engineering School

For the sake of comparison with the CBI course, the capstone project, which is performed in the fourth year at the Telecom Engineering School, will be briefly described. When designing the engineering degree curricula according to the EHEA directives, the Telecom Engineering School adopted the CDIO Standards [8] and, as part of the implementation of the CDIO model, included a project courses path which currently includes a project-based course in the second, third and fourth year of the bachelor. The projects' complexity and degrees of freedom grow along the three iterations and also the team size increases. The capstone project, called Advanced Engineering Project (AEP), is located at the first term of the fourth year and has 12 ECTS credits. Teams of 7-12 students face a complex challenge by splitting in sub-teams, designing and implementing the different parts of the project and finally integrating ant testing the product, process or service, including the definition of a business plan. The teams usually have a mixed composition of students from the different minors of the Telecom Engineering degree (Electronics, Networks, Audiovisual Systems and Communication Systems). This subject has also evolved along the eleven iterations that already occurred. Currently, 8-10 different challenges are offered every semester. 7-8 out of 10 are proposed by companies or external institutions (hospitals, NGOs, …) and 2-3 are proposed by research groups. The projects follow a more classical structure: starting by requirements and even specifications to solve a technical need identified by the stakeholders, the teams build a Project Charter document and a Project Management Plan, following the PMBOK standard, and get them approved by the faculty members and the external advisors. Then they execute the different work packages they have defined until a Critical Design Review approximately located in the 8th week and then continue with the updated project plan until presenting the product or service and delivering the Final Report at the end of the semester (13-15 weeks).

The assessment of the individual performance is obtained by giving an overall mark to every project, which takes into account the different aspects and deliverables (technical performance and complexity, innovation, prototype, reports and presentation). This overall mark is modulated for every individual student with three factors: supervisors' individual assessment, team leader assessment and peer assessment performed by the team peers using a rubric, with a weight of 30% each. The feedback is collected through a reflection document included in the Final Report.

V. CBI and Capstone project examples

Along the 4 editions of the CBI course in which our three institutions have participated, 18 different projects have been carried out, four in the first two years and five the last two years. As examples of the stated challenges:

- How can we design a viable system that allows people to restore or enhance their ability to move?
- How might we improve public health by providing safe access to water?
- How might we deliver food to homes in a new way that maintains the food cold at a selected temperature, ensuring its safety?
- How might we improve the cognitive development and communication skills, and consequently the quality of life, of people with Intellectual and Developmental Disabilities through ICT?
- How could technology help to improve the living conditions of refugees, displaced and other people in need of emergency temporary sheltering?
- How to use new technologies to revamp radiation inspection methods?
- How might we use immersive technologies to design realistic, productive and memorable learning experiences for humanitarian missions in risky environments?

To give an overview of how the projects were developed according with the Design Thinking methodology, we give more details on two of them. About the challenge "How might we improve public health by providing safe access to water?", the six students team explored the needs in the sub-Saharan region through local and remote contacts at NGOs and international agencies. They focused in rural areas in Ghana and first explored the needs: locating water sources, sanitizing the water, improving the safety of the water use, … Then they explored the feasibility of using CERN-derived technologies:

high efficiency solar collectors for disinfecting water, using advanced sensors to perform remote sensing of water sources, advanced filtering devices … In all cases, they shared their findings with the stakeholders. At the end, and through the stakeholders' feedback, they realized that the main problem in this area was not the scarcity of water wells but the fact that more than 70% of wells were out of function. They also found pitfalls in the way the money provided by NGOs was used. The solution they designed (figure 2) and prototyped (figure 3) was a low-cost sensor arrangement that was attached to the well outlet pipe (no need of modifying it), detected if the well was operated through vibration pattern detection, if water was flowing through temperature change detection, and sent an SMS message to a cloud-server that displayed the well status in a synoptic map in the nearby villages and activated a Uber-like network of potential repairers, who would be paid through a NGO when the correct well status was automatically checked. The solution, at the end, only used the C2MON cloud solution from CERN technologies but potentially solved a relevant problem.

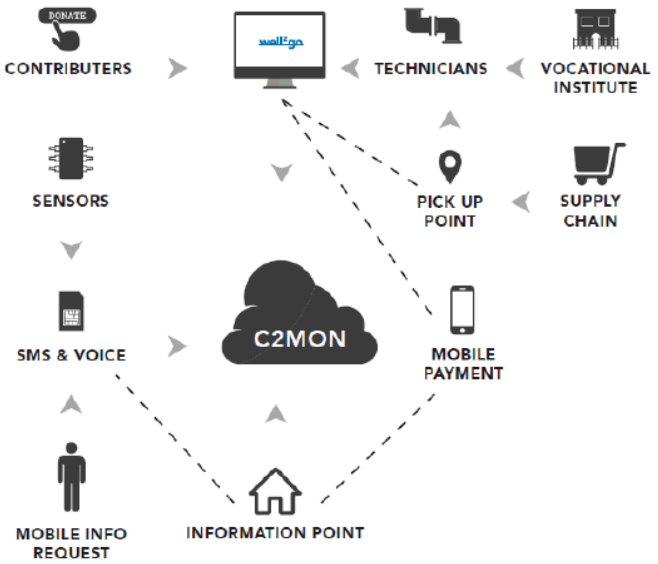


Fig. 2. Block diagram of Well2go, the system designed in the CBI course (2015) to improve the safe use of water in Ghana



Fig. 3. Prototype of the Well2go system

The second of the chosen examples is the challenge "How to use new technologies to revamp radiation inspection methods?". In that case, the students interviewed the CERN experts in radiation inspection, staff at a nuclear plant, managers of radiation therapy facilities in hospitals, public-health officers at the City-Hall, … The conclusion of the research phase was that the highly standardized radiation inspection procedures, although could benefit from an appealing revamp through the use of new technologies (e.g. augmented reality), were a field that affected few people, and that people had strong technical skills and did not really need more comfortable methods which, on the other hand, would find difficulties to be approved by the regulation agencies. In opposition, they found through CERN contacts that there was a radiation-induced problem with high impact in the population due to the accumulated exposition to radon gas in houses and workplaces with low ventilation, which results in a number of lung cancer cases. The students designed and partially prototyped a solution based on radon sensors developed at CERN which also included a service build on top of a database and a smartphone app which calculates and displays the accumulated exposure of an individual to radon gas using sensors and publicly available information and also takes into account the individual susceptibility based on family history of lung cancer and other environmental factors (smoking, …) and that could include genetic data in the future.

Almost all challenges and solutions have a similar story of choosing the relevant need and solution through intense user feedback although the solution was not so appealing from the technological point of view. The final reports and videos of the projects can be found at http://www.cbi-course.com/, under the "Projects" section.

While 10 students per year get their 12 ECTS credits of Advanced Engineering Project through the CBI course, only in the fall term, the remaining 160-200 students per year do it in the regular way through one of the 8-10 capstone projects (AEP) proposed every semester. Up to 78 projects have been carried out up to now. Most of them are new every semester and a few (one-two per semester) may be a continuation or second version of a previous one. A few examples of the kind of topics stated by the stakeholders are the following:

- Software application based on image and video processing to aid the rehabilitation of facial paralysis after facial nerve injury.
- Portable, non-destructive testing equipment to determine the health of "trencadís" tiles of Sagrada Familia temple.
- Improvement of several features in large-format printer sensors
- 3Cat-NXT and Distributed Satellite System projects: successive developments around a Cube-Sat platform
- Cost Effective communication payloads in Stratospheric Balloons

- Localization and monitoring of workers and assets in a Digital Factory indoor environment.
- Automatic analysis of infant sleep structure
- Chatbot for banking user-interface
- Low-cost, robust, autonomous blood-pressure measurement system for developing areas.
- Use of radar for non-contact measurement of ventilation and heart rate in newborns.
- Explore technologies for human-machine interface in vehicles.

In almost all cases, there is an initial statement which points directly to a technical solution, although the initial requirements are a bit open (we ask the stakeholders to do so), and it is a task of the students to explore the client needs around the product and define specifications that have to be agreed with the stakeholders. Nevertheless, in all cases, the need is already identified and in most cases there are clear clues about the technical solution. All projects should have complexity in order to allow splitting them in 3-4 parallel work packages (hardware, firmware, data processing, application and user-interface software, …) and solutions using advanced techniques and high level of abstraction are encouraged. At the end, the students develop a prototype able to perform a demonstration of the developed concept, including a business plan if the result is a product or service or at least the analysis of the engineering costs if it is an internal subsystem. For example, the challenge of detecting the adhesion state of "La Sagrada Familia" tiles (figure 4) resulted in a solution that involved:

- Image processing to identify the individual tiles from a picture taken with a tablet (image segmentation).
- A knocking device to test the tiles and a microphone and an acquisition system to record the resulting sound (based on a Raspberry Pi).
- A signal processing algorithm to distinguish the tiles that are well adhered from those that are not.
- A user interface that allows displaying the tiles which are not well adhered in a user-friendly way.
- A test campaign with reference samples.
- A business model about the possible commercialization of the product for additional uses.

Almost all projects involve a strong technical workload, with the design of several intermediate prototypes including the use of prototyping platforms (development boards, 3D printing, software development frameworks) and accurate treatment of measured data. In the last editions of the course, more than half of the projects proposed by external companies have solutions based only in software, with prevalence of data analytics, machine learning and BlockChain. Also the students' preferences are shifting to these fields.

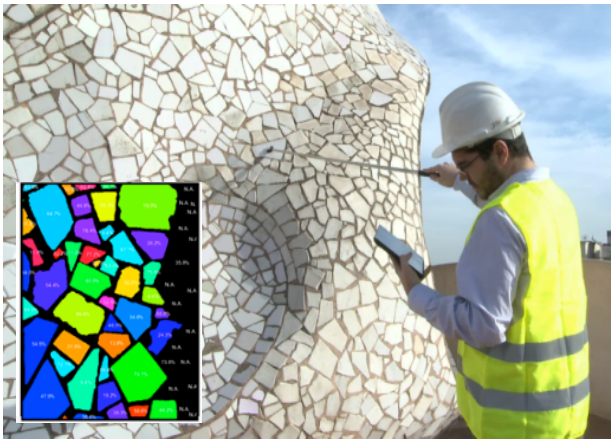


Fig. 4. System to detect adherence of tiles, developed in the AEP course.

VI. CBI AND CAPSTONE PROJECTS COMPARISON

Both types of projects can be compared according to several criteria:

- About the context, in both cases the course provides a context close to a real-world activity and is therefore more suitable to obtain deep learning outcomes than regular theory-lab-problems-exam subjects. There are, however, some differences. In the capstone projects, the context is known and the multidisciplinarity is limited to the different minors into ICT engineering disciplines. On the other hand, in CBI, the context is unknown; all the students (mainly the engineers) are out of their comfort zone and have to learn to work with others.
- About the technical complexity and deepness, as it was said in the previous section, in capstone projects is high and there are strong learning outcomes on the science and technology involved in the solution, although this is not the main goal of the subject. In the CBI course, due to the lower workload devoted to the technical solution (less time, only 2 engineers per team), the complexity and deepness are lower, although relevant. The goal is to provide a final prototype able to provide a proof-of-concept of the critical parts of the solution.
- About the user-needs awareness, in the capstone course is usually low, with some exceptions. Although this aspect has improved since we have external stakeholders for almost all projects, the specifiers are usually engineers and not final customers, and the projects often are technology-driven. In the CBI course, the user awareness is extremely high, and so is the potential innovative impact of results, while the technology takes a secondary role. There is an issue that we have learnt that has to be controlled: Engineering students tend to apply technological solutions in the low-resolution prototyping phases during needfinding and ideation, where they are still

not needed and could distort the user-approach. Also the engineering students (and even the teachers) use to reveal the technology limitations in the ideation phase, where disruptive solutions that go beyond the currently possible solutions could appear.

- About the project planning and documentation, it follows a strict protocol in the capstone projects, using an adapted version of LIPS [9] and PMBOK [10] models. Although it is presented to the students as a way of ensuring the project success, it is often seen as bureaucracy and as an obligation. In creative processes, like the CBI course, however, documentation and planning are not so strict and are mostly based on presentations, videos and low-resolution prototypes, with a lot more iteration and interaction with users than the classic projects. The method can be considered close to the extreme-agile software development method.
- In capstone projects, the students feel stress on the need of completing the assigned sub-system on time and on dealing with incidences. In the CBI projects, the stress is put in the first two thirds of the course in the collaborative sense making (all students from all disciplines participating in all phases) and only in the last third, on the delivery of specialized outcomes.
- About the quality of the results, all these subjects are highly motivating and the project results are usually good or very good, often outstanding. In the capstone project, the students' commitment is medium to high and there are only a very few cases every year of individual students not getting good results and marks, even failing the subject. In the CBI course, the results are usually outstanding. There is a bias factor in the fact that the students compete to be part of this course and some of the best ones are chosen, but there is in any case a very high commitment and also the pressure of presenting at CERN. Also in the capstone projects proposed by external institutions the pressure and commitment are high, while in capstone projects proposed by faculty members, the students feel that are among peers and the context is closer to a regular subject.

VII. Conclusions

The true-multidisciplinary structure of teams has been identified as the highest value of CBI course, above the international experience and the singular environment of CERN and the possibility of contacting high-level scientists and technologies.

The inclusion of intensive periods in singular workspaces, out of the regular classrooms and labs has also been identified as a key factor for success.

The Design Thinking approach provides powerful tools to deal with uncertainty in open challenges, thanks to the systematic way to tackle it through iterative divergent-convergent phases and the test with users and other stakeholders.

This multidisciplinary experience has shown to be a successful tool to enhance the innovation and entrepreneurial skills in engineering students. Due to its cost, it cannot be scaled to all the students, but the methods developed and lessons learnt can be partially applied to capstone projects and even to standard courses.

Not all engineering students are prone to become entrepreneurs. The goal is to identify these who are through the exposition to CBI-like experiences and provide them experiences to enhance the innovation and entrepreneurial skills. The (not so) standard capstone projects would provide tools to get the learning outcomes of analytical design. There is a tradeoff: the direct contact with users improves the creative part (needfinding, ideation) but reduces the time for designing complex solutions and the associated learning outcomes. Then, with limited time and resources, engineering students should choose between acquiring more entrepreneurial skills or more technical skills.

Acknowledgment

The authors would thank the staff and the management at IdeaSquare for the invaluable support and help in the organization of the stays at CERN and for hosting the CERN part of this course: Harri Toivonen, Joona Kurikka, Tuuli Utriainen, Pablo Tello and Markus Nordberg.

References

[1] Loch, C. H., De Meyer, A., & Pich, M. T. (2006). Managing the Unknown. Managing the Unknown: A New Approach to Managing High Uncertainty and Risk in Projects. https://doi.org/10.1002/9780470172377

[2] Brown, T. (2008). Design Thinking. *Harvard Business Review*, (June 2008).

[3] Dym, C. L., Agogino, A. M., Ozgur, E., Frey, D. D., and Leifer, L. J. (2005). Engineering Design Thinking , Teaching , and Learning. *Journal of Engineering Education*, (January).

[4] Carr, S.D., Halliday, A., King, A.C., Liedtka, J., Lockwood, T. (2010). The influence of design thinking in business: Some preliminary observations. *Design Management Review*, 21(3), 58-63.

[5] Ratcliffe, J. (2009). Steps in a design thinking process. https://dschool.stanford.edu/groups/k12/wiki/17cff/ (retrieved 04-04-2013).

[6] Hassi, L., Ramos-Castro, J., Leveratto, L., Kurikka, J.J., Charosky, G., Utriainen, T.M., Bragós, R., Nordberg, M. (2016). Mixing design, management and engineering students in challenge-based projects. Proceedings of the 12th International CDIO Conference, Turku, Finland.

[7] Design Council (2005) https://www.designcouncil.org.uk/news-opinion/design-process-what-double-diamond

[8] Crawley, E. F., Malmqvist, J., Östlund, S., Brodeur, D. R., & Edström, K. (2014). Rethinking engineering education: The CDIO approach, second edition. Rethinking Engineering Education: The CDIO Approach, Second Edition. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05561-9

[9] Svensson T. and Krysander C. (2011) Project model LIPS. Studentlitteratur AB, Lund.

[10] Project Management Institute. (2013). "A guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide)". 5th Edition.. Project Management Institute.

Uso de Métodos Ágiles y Lean en la Realización de Proyectos en Tecnología Electrónica

Manuel Caeiro-Rodríguez
Departamento de Enxeñaría Telemática
E.E. Telcomunicación
Universidade de Vigo
Vigo, España
Manuel.Caeiro@uvigo.es

***Abstract*—Este artículo presenta un estudio sobre la adopción de métodos Ágiles y Lean en los estudios de Ingeniería de Telecomunicación, incluyéndose el área de tecnología electrónica. Dentro de los métodos ágiles se hace uso de SCRUM y como parte de Lean se tiene en cuenta su aproximación para el desarrollo de proyectos innovadores, tomando para ello la referencia de Lean Startup. El propósito del artículo es explorar como la aplicación de dichos métodos es posible en el caso de proyectos en equipo realizados en la asignatura Laboratorio de Proyectos del grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación y valorar los beneficios que puede aportar. Se revisan las ideas fundamentales de estas metodologías y se describen algunas de las prácticas que se desarrollan en el contexto de la asignatura: la estimación de esfuerzo en base a técnicas como Planning Poker, el prototipado rápido, etc. Con su enfoque en equipos auto-organizados se proporciona una plataforma adecuada para practicar la organización de proyectos, potenciándose la autonomía y responsabilidad de los alumnos en todo momento.**

Keywords— aprendizaje basado en proyectos, metodologías ágiles, metodologías lean, SCRUM

I. INTRODUCCIÓN

Durante muchos años en las titulaciones de ingeniería los Proyectos Fin de Carrera (PFC) se planteaban como el hito clave que marcaba el paso del estudiante al ingeniero. En dichos proyectos el alumno, en general de forma individual, debía poner en práctica todos sus conocimientos y competencias en el desarrollo de una solución a un problema relevante de ingeniería. Esto exigía la realización de desarrollos técnicos complejos, pero también la puesta en práctica de otras competencias clave de un ingeniero, como la planificación y la gestión del desarrollo del proyecto, el análisis del problema o la evaluación de los resultados.

Con la llegada de los nuevos grados, los PFC se han reconvertido en los denominados Trabajos Fin de Grado (TFG) y, en general, han perdido una gran parte de la exigencia que tenían anteriormente. Los nuevos TFG cuentan con una dimensión más acotada en el número de horas de trabajo del alumno. Sin embargo, los nuevos grados también demandan el desarrollo de competencias específicas, como la gestión de proyectos, y otras transversales, como el trabajo en equipo o el liderazgo. Se hace por tanto necesario considerar la educación de los futuros ingenieros en estas nuevas competencias. Para ello es necesario hacer una revisión de las competencias a desarrollar y considerar la adopción de nuevas metodologías y herramientas que las promuevan y sustenten.

En este artículo se aborda el estudio de metodología ágiles [1], en especial Scrum, y Lean [2] como aproximaciones para el desarrollo de proyectos en equipo. Estas metodologías se centran sobre todo en la gestión de equipos y también en técnicas como el prototipado rápido, la realimentación de los usuarios y el desarrollo incremental. Se trata de metodologías cada vez más conocidas en las empresas, en donde están siendo adoptadas como metodologías de referencia para el desarrollo de proyectos. Sin embargo, dichas metodologías no han sido introducidas de forma significativa en ámbitos académicos, sobre todo en estudios de ingeniería. Ahora bien, el reto no se encuentra únicamente en introducir estas metodologías en el marco de los estudios de Ingeniería de Telecomunicación, sino en cómo organizar el trabajo académico de acuerdo a las mismas. Frente a la organización tradicional más individual y/o basada en la asunción de un fuerte liderazgo por parte del profesor, en el contexto de las nuevas competencias que se incluyen en los grados se promueve la auto-organización de los equipos, procurando que el alumno asuma mayor autonomía y responsabilidad.

El artículo se estructura como sigue. A continuación, se ofrece una introducción a la metodología Scrum y a la filosofía Lean, revisando algunas de las prácticas que pueden adoptarse en los cursos de Ingeniería de Telecomunicación. Tras ello, en la sección siguiente se describe el planteamiento del curso de Laboratorio de Proyectos en base a estas metodologías. Por último se muestran los primeros resultados obtenidos en su aplicación y el artículo termina con algunas conclusiones.

II. METODOLOGÍAS ÁGILES DE DESARROLLO SOFTWARE

Los métodos de desarrollo software ágiles han cambiado la forma en la que muchos desarrolladores realizan sus proyectos. La principal característica de estos métodos es la "entrega acelerada" de producto al cliente, lo cual se consigue siguiendo una aproximación de desarrollo incremental, basada en el prototipado y en la realimentación continua por parte de los usuarios finales, en lugar de la planificación a priori y documentación extensiva [1].

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

Las metodologías ágiles surgen como aproximación alternativa a las metodologías tradicionales, principalmente en contraposición a las metodologías en cascada, caracterizadas por la planificación por fases bien delimitadas y ejecutadas de acuerdo a un orden predefinido. El movimiento ágil plantea una aproximación más dinámica y "ágil" en la que la atención se centra en el desarrollo de software que pueda entregarse rápidamente y que permita obtener realimentación. Las ideas más importantes de estas nuevas aproximaciones fueron recogidas en el denominado manifiesto ágil [2]. En este manifiesto se establecen los 12 principios ágiles que diferencian las nuevas metodologías de las tradicionales y que pueden resumirse en 4 puntos:

1) Valorar a los individuos y las interacciones del equipo de desarrollo sobre el proceso y las herramientas.

2) Desarrollar software que funciona por encima de producir una documentación exhaustiva.

3) La colaboración con el cliente más que la negociación de un contrato.

4) Responder a los cambios más que seguir estrictamente un plan.

Scrum es una metodología software del tipo ágil en el que pueden encontrarse los 12 principios ágiles. Se trata de una metodología de trabajo, por lo que dichos principios se han trasladado en una organización y planificación muy concretas.

En Scrum hay tres roles fundamentales, responsables del desarrollo de proyectos, a los que se puede unir un rol adicional en forma de cliente, cf. Fig. 1:

1) Product Owner. Es la persona encargada de la dirección y control del *Product Backlog*, así como las fechas de las entregas, que han de ser establecidas en acuerdo con el equipo. Define las funcionalidades del producto y toma las decisiones de negocio, siendo responsable de la rentabilidad del producto. Puede ser el propio cliente u otra persona que esté en contacto directo con el cliente. A su vez, ha de asistir a todas las reuniones de planificación y revisión de cada sprint y estar en contacto contínuo con el equipo.

2) Scrum Master. Es el responsable de la correcta aplicación de la metodología Scrum en el desarrollo del proyecto por parte del equipo, guiando las reuniones, eliminando impedimentos y ayudando al equipo. Es desarrollador al 50% y toma decisiones rápidas, asegurando que el equipo es completamente funcional y productivo, estando además a su servicio. Representa al equipo frente al propietario de producto y al propietario frente al equipo.

3) Scrum Team. El equipo es multifuncional, auto-organizado y su único propósito es cumplir con el objetivo del sprint. Cada equipo estará formado por un número pequeño de personas, siendo 7 el número ideal (± 2 personas), que trabajan estando en contacto constante.

4) Cliente. El cliente es el beneficiario final del producto. Viendo los progresos pueden aportar ideas, sugerencias o necesidades no contempladas.

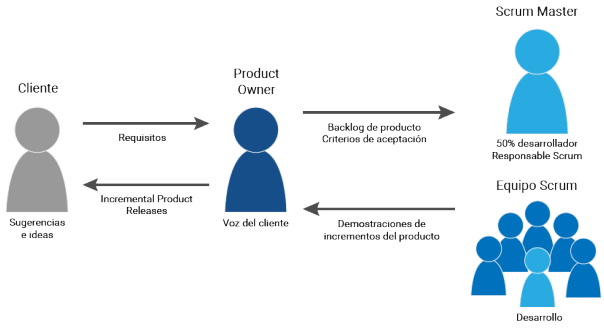


Fig. 1. Roles de Scrum

Scrum plantea el trabajo en equipo en base a ciclos de desarrollo cortos denominados sprints, Ver Fig. 2. Un sprint dura un periodo que puede ir desde un par de semanas hasta un mes. Cada sprint se inicia con una reunión preparatoria, *Sprint Planning Meeting*, en la que se definen las historias de usuario que se van a realizar durante dicho sprint, denominado como *Sprint Backlog* y termina con la entrega del software producido al Cliente o *Product Owner*, para que lo pueda probar y ofrecer realimentación, en la denominada reunión de revisión (*Sprint Review*). El producto a desarrollar se define en el *Product Backlog* como el conjunto de historias de usuario del proyecto. Este *Product Backlog* es acordado entre el *Product Owner* y el *Scrum Team*. Al inicio de cada nuevo *Sprint*, se crea el *Sprint Backlog* como un subconjunto del *Product Backglog* con la participación del *Product Owner*, *Scrum Master* y *Scrum Team*. Para ello el enfoque principal se pone en maximizar el valor que se puede ofrecer durante el *Sprint*. De forma diaria durante el sprint se realizan con la participación de todos los miembros del *Scrum Team* reuniones de pie breves de no más de 15 minutos, denominadas como *Daily Scrum Meetings*. El hecho de hacerlas de pie contribuye a que estas reuniones sean breves. Cada miembro del *Scrum Team* debe contar su trabajo dando respuesta a las siguientes tres preguntas: que hizo ayer, que planes tiene para hoy y los problemas que encuentra que le pueden impedir realizar su trabajo en los próximos días. Al final de cada sprint, además de la *Sprint Review*, se puede realizar una reunión conocida como *Sprint Retrospective* cuyo propósito es reflexionar acerca del sprint que acaba de terminar tratando de identificar oportunidades de mejora.

Como se puede ver en las descripciones anteriores en Scrum se utilizan una serie de artefactos que son claves dentro de la metodología. El principal artefacto es el propio producto, pero hay otros tres que son clave:

1) Product Backlog. Historias de usuario que describen la funcionalidad necesaria desde la perspectiva del usuario.

2) Sprint Backlog. Es creado por el equipo el primer día de un sprint, durante la reunión de planificación. Contiene las historias que el equipo hará durante el sprint.

3) Burndown Chart. Son diagramas en los que se muestra el trabajo que queda en un sprint y la velocidad del equipo.

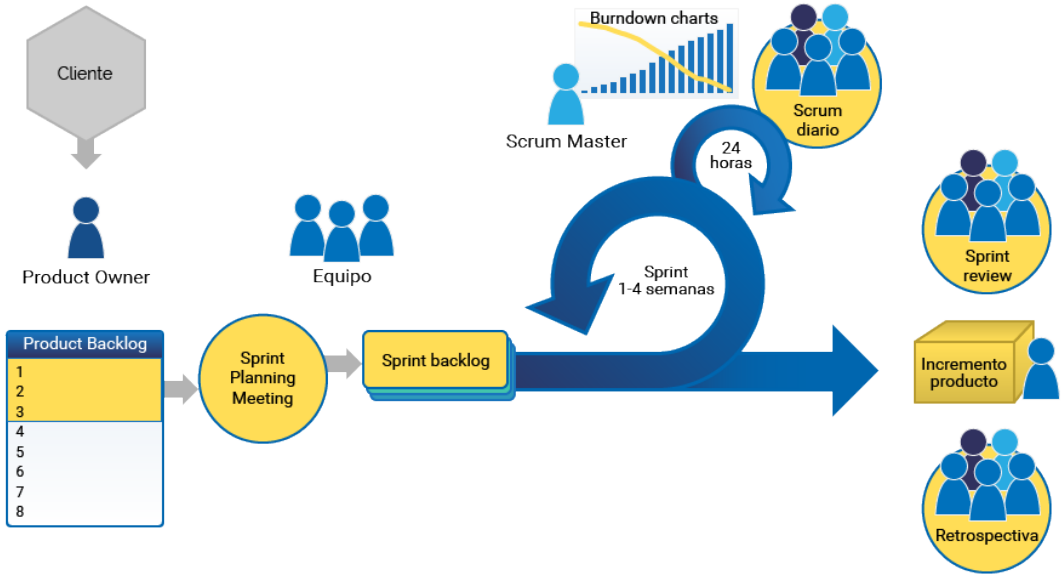


Fig. 2. Visión general de Scrum con artefactos y actividades

Para facilitar el desarrollo de las distintas actividades planteadas en Scrum se proponen varias técnicas y dinámicas. A continuación se introducen dos de las más relevantes.

A. Formulación de historias de usuario

En las metodologías ágiles la planificación de proyectos se aborda en base a las historias de usuario. Estas historias recogen lo que el cliente o usuario quiere que se implemente. Se trata de una descripción breve de una funcionalidad software tal y como la percibe el usuario [3]. Para la formulación de historias de usuario se suelen utilizar unas fichas o tarjetas en las que se incluyen los siguientes campos:

1) Identificador.
2) Título.
3) Descripción. Si bien el estilo puede ser libre, la descripción debiera responder a tres preguntas: ¿quién se beneficia? ¿qué se quiere? Y ¿cuál es el beneficio?
4) Estimación. Se trata una valoración numérica de la complejidad que se supone a la historia en cuanto al coste de su desarrollo por el equipo. Los puntos de esta valoración suelen denominarse puntos de historia. Aunque su propósito es representar el tiempo teórico de desarrollo para una persona, lo realmente importante es que la estimación para distintas tareas tenga mantenga una valoración relativa acorde. Es decir, que una historia que requiera el doble de esfuerzo que otra tenga una estimación que sea el doble.
5) Valor. Normalmente valoración numérica que aporta la historia de usuario para el cliente o usuario.
6) Dependencias. En general una historia de usuario no debería ser dependiente de otra, pero en ocasiones lo es y en esos casos es importante recoger dicha dependencia.
7) Condiciones de satisfacción. Relativas a pruebas de aceptación con las que determinar cuando se ha completado la historia.

Para el campo de descripción se recomienda seguir el siguiente patrón: "Como [rol de usuario" quiero [objetivo] para poder [beneficio]". El objetivo del equipo es maximizar el valor y la satisfacción percibida por el cliente o usuario en cada sprint.

B. Estimación de la complejidad de las historias de usuario

Durante la planificación cada historia debe ser estimada en puntos de historia que representa su complejidad relativa desde el punto de vista de desarrollo. Más que ofrecer una estimación más o menos acertada, lo importante es tener una buena estimación e relación a otras historias de usuario. Por ejemplo, una historia de usuario que tenga el doble de puntos de historia que otra debiera requerir el doble de trabajo.

Para la estimación de los puntos de historia se puede utilizar la dinámica de *Planning Poker* (PP). Se trata de una actividad colaborativa en la que debe participar todo el equipo de desarrollo. Las historias de usuario se toman una a una del *Product Backlog*. Para cada historia, el *Product Owner* empieza explicando sus requisitos. A continuación, el equipo discute sobre el trabajo que supone y pregunta al *Product Owner* cuando requiere alguna aclaración. Cuando la historia ha sido discutida en profundidad, cada miembro del equipo de forma individual y privada estima el esfuerzo requerido ylo cuantifica con un número de puntos de historia que bien escribe en una tarjeta, o indica eligiendo una carta de la baraja (por ello lo de Póker). Si las estimaciones de los distintos miembros difieren mucho, los miembros comentan sus estimaciones, especialmente los que han hecho la estimación más alta y más baja. Después de la puesta en común, se vuelve a repetir el proceso de estimación individual utilizando las tarjetas o cartas hasta que se llegue a consenso.

Otra dinámica para la estimación de puntos de historia es el juego de estimación en equipo (TEG: *Team Estimation Game*). Esta dinámica surge porque en casos de *Product Backlogs* con

muchas historias de usuario la estimación con PP se suele hacer muy tediosa y requerir mucho tiempo [4]. Por ello, en el caso de TEG se propone una aproximación más global, teniendo en cuenta todas las historias de usuario al mismo tiempo en base a un proceso con dos pasos. En un primer paso, las historias de usuario se distribuyen en columnas de acuerdo a la estimación del esfuerzo requerido para completarlas. En un segundo paso, a cada columna se le asigna un número de puntos de historia. Para hacer esta dinámica se necesita un espacio bastante grande, e.g. un tablero, de forma que se puedan disponer sobre ella las tarjetas de todas las historias de usuario. De forma similar al PP los miembros del equipo toman las historias de usuario una por una. El primer miembro del equipo coge la primera tarjeta de la primera historia de usuario del *Product Backlog* y la sitúa en el tablero. Después, el siguiente miembro del equipo selecciona otra tarjeta y la sitúa en una posición relativa a la anterior. Las historias menos complejas se sitúan a la izquierda y las más complejas a la derecha. En caso de tener la misma complejidad se sitúan en la misma columna. Los miembros del equipo además de situar nuevas tarjetas en el tablero también pueden mover una tarjeta ya situada si consideran que el orden en el que está puesto no es adecuado, o pasar, si está de acuerdo con el orden relativo es adecuado y no hay más tarjetas. La dinámica se repite con la participación iterativa de cada uno de los miembros del equipo hasta que todos deciden pasar. De esta forma, el equipo pueden ver las tarjetas ordenadas en columnas de acuerdo a su complejidad y a continuación asignar a cada columna una estimación del esfuerzo

III. LEAN

Lean Manufacturing es una filosofía, convertida en modelo de gestión, enfocada a minimizar los recursos empleados para maximizar el valor entregado al cliente a través de un aumento de la productividad y de la calidad. En la filosofía Lean se reconocen cinco principios clave, cf. Fig. 3:

1) Identificar valor para el cliente. Identificar la características que necesita el cliente y eliminación de todas las actividades que no son de valor añadido y/o optimización del uso de los recursos escasos (capital, gente y espacio).

2) Identificar la cadena de valor para cada producto/servicio. Definir la secuencia de pasos para la obtención del producto final.

3) Crear un flujo continuo. Ejecución contínua de las tareas del proceso, eliminando obstáculos.

4) Procesos "Pull". Los productos son solicitados por el cliente final, no empujados por el final de la producción. De esta forma se minimiza el desperdicio.

5) Mejora continua. Partir de que todo se puede mejorar. Se trata de reducir costes, mejorar la calidad, aumentar de la productividad y compartir la información.

Un punto clave dentro de la filosofía Lean es la eliminación de los desperdicios. En las actividades de fabricación se han identificado 7 fuentes principales de desperdicios que se utilizan para dirigir las mejoras: exceso de producción, esperas o tiempos muertos, transporte, sobre-procesamiento, producción de inventario, movimiento y productos defectuosos. En el ámbito del desarrollo software, pero también aplicable al desarrollo de proyectos en general, también se han identificado cuestiones que son consideradas como desperdicios y que deberían minimizarse [5]:

1) Errores en los desarrollos que requieren rectificación o que no satisfacen las necesidades del cliente.

2) Desarrollo de funcionalidades innecesarias o no solicitadas por el cliente.

3) Requisitos y diseños definidos por adelantado empleando periodos de tiempo excesivos, que cambian al modificarse las necesidades del cliente.

4) Realizar procesos innecesarios (como el exceso de burocracia) o con pasos innecesarios.

5) Reuniones innecesarias o demasiado largas e improductivas.

6) Esperas en el flujo de trabajo provocados por cuellos de botella: personas que esperan por trabajos que no se han entregado a tiempo.

7) El cambio de tareas constante provoca grandes pérdidas de tiempo.

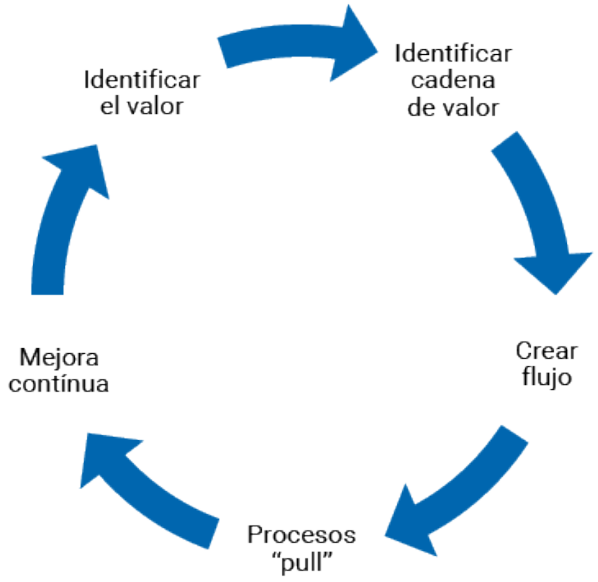


Fig. 3. Los cinco principios clave de la filosofía Lean

La filosofía Lean cuenta con una variante para el desarrollo de productos y empresas innovadoras conocida como Lean Startup [6]. La idea clave de esta filosofía se centra en reducir el mayor desperdicio que puede producirse cuando se está creando un producto nuevo: que no funcione o que no aporte valor al usuario final, es decir, que el cliente no esté dispuesto a pagar por ello. La metodología Lean Startup implica un conjunto de buenas prácticas pensadas para reducir el ciclo de desarrollo del producto, reducir el coste de dichos desarrollos y mejorar en el conocimiento de las verdaderas necesidades de los clientes. Algunas de estas prácticas son el prototipado rápido, la entrega de valor al cliente y el aprendizaje a través de la realimentación. Un concepto clave en esta metodología es el de Producto Mínimo Viable (MVP: *Minimum Viable Product*),

como el producto que de la forma más rápida posible se le puede dar al cliente y que este puede utilizar directamente. Lógicamente se tratará de un producto con una funcionalidad mínima, pero que debe aportar algún valor al cliente. Esto es clave para poder empezar a tener realimentación de calidad sobre el producto y con ello mejorar el desarrollo del mismo.

Los usuarios que testean los productos y proporcionan la realimentación se conocen como "*early adopters*". Se trata de usuarios muy específicos cuya principal característica es ser pioneros en el uso de productos, sobre todo aquellos basados en la innovación tecnológica. Por ello, una cuestión relevante en el desarrollo de proyectos de acuerdo a esta aproximación es la identificación de un grupo fiable de "*early adopters*" que permitan asegurar el buen desarrollo del prototipo.

A. Prototipado rápido

Una de las mejores formas de avanzar en el desarrollo de un producto es realizando alguna forma de prototipado. En la metodología Lean Startup es clave el desarrollo de prototipos al menor coste posible y de la forma más rápida posible. El objetivo de los prototipos es obtener realimentación de los posibles usuarios finales y permitir "aprender" o validar las ideas al menor coste posible, reduciendo con ello posibles "desperdicios". Esta visión parte de la idea de desarrollo del nuevo producto como un proceso de experimentación, que se inicia con la realización de una "hipótesis" o idea y para la que diseñamos un "prototipo" o experimento con la que validar dicha idea. Los prototipos nos permiten pensar sobre las soluciones de una forma diferente, sobre un producto tangible frente a unas ideas abstractas, así como a equivocarnos y aprender de forma rápida y barata, lo que largo plano nos resulta más rentable.

El prototipado rápido es una herramienta de la metodología Lean que plantea el desarrollo de prototipos a bajo coste. En el contexto de desarrollo de proyectos innovadores no es necesario que los participantes tengan una gran experiencia, siendo incluso en ocasiones es más conveniente que no lo sean para facilitar el planteamiento de soluciones novedosas. El proceso de prototipado se inicia planteando los objetivos, que no deben ir dirigidos a la consecución de un diseño final definitivo, sino a buscar pequeños cambios incrementales sobre un diseño que va evolucionando. La realización de prototipos puede producirse a diferentes niveles de cercanía con el producto final. Por ejemplo, en el caso de aplicaciones informáticas se puede empezar con unos dibujos en papel que representen las distintas pantallas de la interfaz de usuario que permitan hacer una demostración de la futura interacción con el usuario pasando de un dibujo a otro. Para el prototipado de dispositivos tangibles, como el ratón de un ordenador, se pueden utilizar distintos materiales como cartón o piezas de plásticos que ayuden a reproducir el producto. En general se suele distinguir entre prototipos de baja fidelidad, como la realización de guiones (*storyboards*), esquemas, tarjetas o prototipos de "Mago de Oz", en las que una persona se oculta y desarrolla el comportamiento esperado del producto, como una máquina expendedora de bebidas. Por otra parte también se pueden realizar prototipos de alta fidelidad, que tienen un parecido más cercano con el producto final y que incluso tienen un comportamiento similar al mismo. Durante la evolución de un proyecto es habitual pasar de prototipos de baja fidelidad a uno de alta calidad.

En relación con la elaboración de prototipos en los que es necesario la elaboración de algún circuito electrónico e incluso placas es de destacar la variedad de opciones disponibles hoy en día. Además de los Arduinos, Raspberries, Beagle Bones y otros de la comunidad del hardware libre también es posible encontrar proveedores de componentes e incluso de elaboración de placas que por un precio reducido y de forma rápida facilitan el desarrollo de prototipos. Por ejemplo PCBway (https://www.pcbway.com/) es un proveedor chino que además de ser rápido, ofrece gran cantidad de opciones y control de la fabricación en todo momento.

IV. LABORATORIO DE PROYECTOS

En esta sección se presenta la experiencia en la asignatura Laboratorio de Proyectos en la que se están introduciendo las metodologías Scrum y Lean, tal y como se desarrolla en la Escuela de Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad de XXX. La característica principal de esta asignatura es el desarrollo de proyectos en equipo. El objetivo de la misma es desarrollar una solución propia a un problema real, para lo cual los equipos tienen que enfrentarse a su análisis, planificación, diseño, realización de prototipos y pruebas.

La asignatura de Laboratorio de Proyectos se sitúa en el último cuatrimestre de los estudios de Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación. En paralelo con esta asignatura los alumnos deben realizar el TFG. Ambas asignaturas tienen la misma carga de trabajo para el alumno, siendo la diferencia fundamental entre ambas el trabajo en equipo frente al individual. Otras diferencias importantes vienen derivadas del carácter multidisciplinar de Laboratorio de Proyectos. Teniendo en cuenta las distintas especialidades del plan de estudios, a saber, Ingeniería Telemática, Tecnología Electrónica, Señal y Comunicaciones, y Sonido e Imagen, los proyectos deben involucrar el desarrollo de soluciones en al menos dos de estas disciplinas. Para ello los equipos se conforman con alumnos de distintas especialidades y cada equipo de alumnos es supervisado por dos tutores de distintas áreas. Esto marca una diferencia fundamental frente al carácter individual y por lo general unidisciplinario del TFG, en el que normalmente un único tutor se encarga de la supervisión de un único alumno trabajando en un proyecto con una temática específica. Por tanto, el carácter colaborativo y multidisciplinar de la asignatura de Laboratorio de Proyectos es una característica distintiva de la misma, lo que permite plantear objetivos de aprendizaje y competencias distintas pero también requiere del desarrollo de estrategias pedagógicas, organizativas y para la evaluación diferentes.

En la asignatura de Laboratorio de Proyectos se plantea la consecución de numerosas competencias, involucrando tanto competencias generales propias de la Ingeniería de Telecomunicación, como competencias específicas y competencias transversales relativas a la autonomía o al trabajo en equipo. En la Tabla I se incluyen todas las competencias de la asignatura. Para favorecer el trabajo en estas competencias consideramos que es importante los criterios elegidos para la elección de los proyectos. En concreto se establece como

criterio que los problemas reales, significativos y cercanos. No es un requisito que en el proyecto se desarrolle una solución innovadora en relación a productos ya desarrollados, pero sí que en la misma se tenga en cuenta las características específicas del problema real y cercano para el que se plantean. Este tipo de escenario requiere la puesta en práctica de las competencias indicadas.

TABLA I. COMPETENCIAS DE LABORATORIO DE PROYECTOS

Competencias Generales	Capacidad para redactar, desarrollar y firmar proyectos en el ámbito de la Ingeniería de Telecomunicación
	Capacidad para resolver problemas con iniciativa, para la toma de decisiones, la creatividad y para comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas, comprendiendo la responsabilidad ética y profesional de la actividad de Ingeniero de Telecomunicación
	Facilidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.
	Conocer y aplicar elementos básicos de economía y de gestión de recursos humanos, organización y planificación de proyectos, así como de legislación, regulación y normalización en las Telecomunicaciones
	Capacidad para trabajar en un grupo multidisciplinar y en un entorno multilingüe y de comunicar, tanto por escrito como de forma oral, conocimientos, procedimientos, resultados e ideas relacionadas con las telecomunicaciones y la electrónica.
	Saber aproximarse a un problema nuevo abordando primero lo esencial y después lo accesorio o secundario.
	Desarrollo de la capacidad de discusión sobre cuestiones técnicas.
Competencias Específicas	Capacidad para la elaboración de propuestas de proyectos técnicos conforme a los requerimientos especificados en una convocatoria.
	Capacidad para la dirección técnica de un proyecto de telecomunicación.
	Capacidad para la gestión económica y de recursos humanos de un proyecto de telecomunicación.
	Capacidad para la elaboración de informes técnicos y de seguimiento de un proyecto de telecomunicación.
Competencias Transversales	Desarrollar la autonomía suficiente para llevar a cabo trabajos del ámbito temático de las Telecomunicaciones en contextos interdisciplinares.
	Concebir la Ingeniería en un marco de desarrollo sostenible.
	Favorecer el trabajo cooperativo, las capacidades de comunicación, organización, planificación y aceptación de responsabilidades en un ambiente de trabajo multilingüe y multidisciplinar, que favorezca la educación para la igualdad, para la paz y para el respeto de los derechos fundamentales.

La aproximación pedagógica principal de la asignatura es la conocida como "aprender haciendo" (*learning by doing*). De acuerdo a esta aproximación, son los alumnos los que aprenden a través de su propia experiencia práctica. El desarrollo de esta aproximación no es en absoluto extraño a los estudios de ingeniería, especialmente en relación a los antiguos PFC. En ambos casos el alumno se debe enfrentar por sus propios medios a la resolución de un problema significativo, o proyecto, que debe tratar de resolver con la guía y supervisión de un tutor. El papel del tutor es secundario, siendo la responsabilidad y el trabajo principal de los alumnos. Algunas cuestiones a destacar en el desarrollo de la asignatura, que en la práctica sustenta esta aproximación, son la carga de trabajo de tutores y alumnos y la firma de un acuerdo sobre los derechos de los posibles resultados derivados del proyecto. En cuanto a la carga de trabajo, cada alumno tienen que dedicar 20 horas semanales, mientras que cada tutor solo 1 hora cada 2 semanas. En cuanto a la firma del acuerdo sobre derechos, la misma sólo se hace entre los alumnos del equipo, que tal y como reconoce la legislación española vigente son los únicos y exclusivos propietarios de sus trabajos académicos. Estas dos cuestiones sitúan con claridad la responsabilidad del proyecto y la necesidad de que los alumnos realicen por sí mismos las tareas que requiera tanto la planificación como el desarrollo del proyecto. De forma adicional también puede jugar un papel importante y reforzar esta aproximación el hecho de que los alumnos pueden elegir el problema a resolver en su proyecto. No es algo obligatorio, pero aquellos alumnos que quieran constituir un equipo escogiendo a sus compañeros deben proponer un problema. Con ello se pretende aumentar la motivación del equipo, incentivar su iniciativa y contribuir a que los equipos asuman el proyecto como suyo y por tanto se comprometan en mayor medida con la responsabilidad de su desarrollo. Los alumnos que no hacen una propuesta de un proyecto son asignados de forma arbitraria a distintos equipos.

En cuanto a las características organizativas es donde entran en juego las propuestas de las metodologías ágiles, concretamente Scrum y Lean. El curso dura 15 semanas y se sitúa en el segundo cuatrimestre del cuarto curso del Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación. El diseño del curso se basa en la metodología Scrum y el mismo se organiza en base a 4 o 5 sprints. El primer sprint dura 4 semanas y sirve como preparación del proyecto. El resto de los sprints duran entre 2 y 3 semanas, aunque los equipos tienen libertad para plantear su duración. Durante el sprint inicial, además del trabajo en equipo, tienen lugar algunas clases en las que se explica a los alumnos las ideas y principios de Scrum junto con algunas de sus prácticas. También se introducen los principios de Lean y se introducen prácticas sobre la realización de presentaciones e informes escritos. Al final de este sprint inicial, cada equipo debe realizar una pequeña presentación a modo de *Sprint Review* en la que presenta el problema, las historias de usuario que constituyen su *Product Backlog*, su planificación en *Sprints* teniendo en cuenta la estimación del esfuerzo, y los prototipos que van a desarrollar de acuerdo a su plan de trabajo. El resto de sprints se desarrollan de acuerdo a la estructura propia de desarrollo. Cada sprint empieza con una reunión de planificación en la que los miembros del equipo negocian los contenidos de la siguiente iteración con el *Product Owner* y desarrollan la versión inicial del *Sprint Backlog*. Durante el sprint, el equipo se reúne de forma regular en las *Daily Scrum Meetings*. Al final del sprint, tienen lugar las reuniones de revisión de sprint y de retrospectiva desSprint con los tutores. En la reunión de revisión, los alumnos presentan sus resultados mientras que en la reunión de retrospectiva se revisa el proceso de desarrollo tratando de encontrar puntos de mejora.

Como herramientas de soporte para el trabajo en equipo se recomienda Trello en cuanto a la organización, y planificación de tareas, Slack para la comunicación y Wikispaces como herramienta para el mantenimiento de la documentación del

proyecto. En cualquier caso, cada equipo tiene libertad para elegir y utilizar las herramientas que considere convenientes.

En cuanto a la evaluación, cabe destacar que se hace una evaluación plural en la que participa tanto un tribunal único que evalúa todos los proyectos, como los tutores y los miembros del equipo que participan en la evaluación de los proyectos en los que han estado involucrados. Cada uno de estos evaluadores se ocupa de la valoración de distintas competencias, teniendo en cuenta las evidencias generadas. La evaluación del tribunal es realizada en base a los siguientes resultados: una memoria breve, de no más de 10 páginas, en la que el equipo resume todo su trabajo; una presentación de 10 minutos en la que participan todos los miembros del equipo y que va seguida de un turno de 10 minutos por parte de un tribunal; y una sesión de tipo "feria" en la que el equipo presenta su proyecto, incluyendo el prototipo final desarrollado y un póster, a todos los alumnos, profesores y personal de la escuela. Esta "feria" de proyectos acostumbra a ser un gran evento en la escuela, lo cual motiva de forma significativa el trabajo en sus proyectos porque los ven expuestos y valorados más allá de los trabajos que realizan en otras asignaturas.



Fig. 4. Miembros de un equipo presentando su proyecto con su prototipo y su póster

V. Resultados Obtenidos y Problemas Encontrados

La asignatura de Laboratorio de Proyectos tuvo su primera edición en el curso 2013-2014. En este curso 2017-2018, en su quinta edición, se está introduciendo en la misma el uso de las metodologías Scrum y Lean, aunque en las ediciones anteriores algunos equipos de forma independiente ya utilizaron algunas prácticas propias de dichas metodologías.

Durante el presente curso académico, en el momento de escribir este artículo, los equipos han completado el primer Sprint. Se han realizado la formación inicial en las metodologías Scrum y Lean y las primeras reuniones de revisión y retrospectiva. De forma especial cada equipo ha realizado una presentación breve de 7 minutos en la que resume los puntos más relevantes de su trabajo y donde en general se ha valorado como positiva la utilización de estas metodologías para la realización de los proyectos.

A partir de ahora se plantea la recogida de datos de cara a la investigación de la experiencia. A lo largo del cuatrimestre los alumnos designados como *Product Owner* y *Scrum Master* serán preguntados en relación a su experiencia. Se les preguntará por su experiencia con las distintas actividades y artefactos Scrum: adecuación del *Product Backlog*, precisión de las estimaciones de esfuerzo, mantenimiento del *Sprint Backlog*, carga de trabajo administrativa, co-operación con el *Scrum Master* y el *Product Owner*, calidad del trabajo en equipos, adecuación de la carga de trabajo, satisfacción general con el proyecto y satisfacción general con la metodología. También se indagará sobre las herramientas utilizadas para apoyar su trabajo en cuanto a su utilidad y las dificultades que han tenido con el uso de los mismos. Para evaluar la extensión con la que los estudiantes son capaces de sacar partido a las metodologías se les preguntará a todos los participantes sobre su nivel de acuerdo o desacuerdo con 9 afirmaciones indicadas en [7], ver Tabla II. Para cada opción se utilizará una escala de Likert de 5 opciones.

TABLA II. Scrum benefits

1	El producto se desarrolla como una serie de partes manejables
2	Se ha progresado, incluso cuando los requisitos no eran estables
3	Todo es visible para todo el mundo
4	Las comunicaciones han sido buenas
5	El equipo comparte éxitos a lo largo del desarrollo y al final
6	Los clientes han podido ver entregas de incrementos en tiempo
7	Los clientes obtienen información frecuente sobre como funciona realmente el producto
8	Se ha desarrollado una relación con el cliente, creando confianza y aumentando el conocimiento
9	Se ha creado una cultura donde todo el mundo espera que el proyecto tenga éxito

VI. Conclusiones

Como conclusiones de este artículo se puede indicar que la integración de Scrum y Lean, en particular la vertiente Lean Startup, para el desarrollo de proyectos en el ámbito de la Ingeniería de Telecomunicación es posible y que puede mejorar la preparación de los alumnos como ingenieros. Estas metodologías preparan a los alumnos para desarrollar proyectos en equipo y en situaciones de incertidumbre en relación al producto a desarrollar. Se trata de metodologías que se adaptan bien a las competencias a desarrollar y que por otra parte se están imponiendo en la industria, donde cada vez son más utilizadas y demandadas para su personal.

En el artículo se muestra que el diseño de la asignatura no sólo permite la introducción de las metodologías, sino que las mismas se ajustan de una forma bastante directa a las necesidades y objetivos que se pretenden cubrir. La experiencia de algunos equipos que en años anteriores adoptaron estas metodologías de forma voluntaria nos hace ser optimistas sobre los resultados previstos. En cualquier caso, aún es una tarea pendiente recoger los datos correspondientes a la experiencia que se está desarrollando en este curso y analizarlos para determinar el mayor o menor éxito e identificar posibles problemas.

ACKNOWLEDGMENT

Este trabajo cuenta con el apoyo del proyecto LEAP 2016-1-EL01-KA203-023624 financiado por la Comisión Europea a través de la acción KA2 del programa Erasmus+ que tiene como propósito promover la implantación de metodologías ágiles y Lean en educación superior.

REFERENCES

[1] B. Boehm, "Get Ready for agile methods, with care," Computer, vol. 35, no. 1, pp. 64-69, 2002.

[2] K. Beck, M. Beedle, A. Van Bennekum, A. Cockburn, W. Cunningham, M. Fowler, et al., "Manifesto for agile software development", 2001.

[3] M. Cohm, "User stories applied: For agile software development," Addison-Wesley Professional, 2004.

[4] M. Poženel, y V. Mahnič, "Studying agile software estimation techniques: the design of an empirical study with students," Global Journal of Engineering Education, vol. 18, no. 2, 2016.

[5] M. Poppendieck, y T. Poppendieck, "Lean software development: an agile toolkit," Addison-Wesley, 2003.

[6] E. Ries, "The lean startup: How today's entrepreneurs use continuous innovation to create radically successful businesses," Crown Books, 2011.

[7] L. Rising, y N. S. Janoff, "The Scrum software development process for small teams," IEEE software, vol. 17, no. 4, pp 26-32, 2000.

PÓSTERES

SDSoC como herramienta de codiseño HW/SW para Trabajos Fin de Grado en Informática

Eduardo Magdaleno, Manuel Rodríguez, Cristhian García
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de La Laguna
San Cristóbal de La Laguna, Canarias, España
emagcas, mrvalido@ull.edu.es

Fernando Pérez
Departamento de Ingeniería Informática
Universidad de La Laguna
San Cristóbal de la Laguna, Canarias, España
fdoperez@ull.edu.es

***Abstract*— Este trabajo presenta los resultados obtenidos en un Trabajo Fin de Grado en Informática que tenía como cometido optimizar el algoritmo de cálculo de la NFFT (non-uniform fast Fourier transform) empleando un dispositivo Zynq. Como novedad, la implementación hardware del algoritmo fue realizada empleando la nueva herramienta SDSoC (software-defined system-on-chip), que facilita el empleo de tecnologías basadas en FPGA (field-programmable gate array) a desarrolladores que no disponen de un conocimiento avanzado en ellas, como, por ejemplo, un estudiante de Informática.**

Keywords—Trabajo Fin de Grado; FPGA; Diseño Digital; Zynq; SDSoC; APSoC; codiseño HW/SW

I. INTRODUCCIÓN

Los alumnos del Grado en Informática de la Universidad de La Laguna adquieren conocimientos notables en diversos lenguajes de programación de alto nivel entre los que se incluye C/C++. Por otro lado, han recibido en el primer curso un contacto básico con el lenguaje VHDL, realizando ejercicios sencillos en una FPGA [1].

La nueva herramienta de desarrollo SDSoC podría permitir la realización de diseños digitales complejos basados en tecnologías híbridas FPGA/uC, empleando C/C++, por parte de alumnos sin un conocimiento exhaustivo de esta metodología (como los graduados informáticos), diseñando a alto nivel y soslayando en buena media las fases más complejas. De hecho, el análisis de *profiling* permite determinar qué componentes del diseño son más indicadas para su realización HW (lógica programable) y cuáles en SW (micro).

Para probar la bondad de la herramienta, se propuso un TFG en Informática para la optimización hardware de un algoritmo ya implementado en C, en este caso la Transformada Rápida de Fourier para datos no equiespaciados, NFFT [2], que es un algoritmo que se emplea en astrofísica, procesado de imágenes/vídeo, medicina, análisis sismológico, etcétera [3-5].

Se parte de códigos de la implementación del algoritmo tanto en Matlab como en C, con unos datos de entrada y salida para comprobar la bondad de la implementación. El alumno debe particionar el código C en varias funciones que sean susceptibles de ser pasadas a una implementación hardware, pues esto es un requisito de la herramienta. SDSoC estudia qué particionado HW/SW es el óptimo en relación a recursos disponibles/aceleración. Esto se hace a través de la herramienta de *profiling* de la que dispone el SDSoC [2]. Es preciso que el ingeniero introduzca en el código una serie de directivas que empleará la herramienta para implementar en hardware las partes deseadas del código con mayor o menor eficiencia (paralelizando bucles, por ejemplo).

La implementación del algoritmo se realiza en un dispositivo Zynq de la compañía Xilinx, que es un APSoC (all-programmable system-on-chip), un dispositivo híbrido que combina un ARM con una parte de lógica programable pensada para procesamiento de alto rendimiento explotando técnicas de paralelismo y pipeline en las etapas más complejas de cualquier algoritmo.

Este trabajo presenta las experiencias más relevantes encontradas usando la herramienta SDSoC para diseñar e implementar una versión computacionalmente más eficiente en términos de velocidad de ejecución. El algoritmo se modificó para su implementación en un SoC empleando una codificación en C con pragmas. De esta manera, el alumno no necesitó invertir tiempo en detalles de un nivel de abstracción bajo con VHDL y pudo explorar varias alternativas de arquitectura en un periodo de tiempo relativamente corto.

Este trabajo está estructurado en cinco secciones incluyendo esta Introducción. Primero se introduce brevemente el algoritmo de la NFFT y las modificaciones a realizar en el código C para que éste pueda ser tratado convenientemente por el SDSoC. En el apartado 3 se describe la tecnología empleada para la implementación del algoritmo, así como lo metodología de diseño. En la sección cuarta se muestran los resultados obtenidos y en la quinta las conclusiones.

II. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO Y ADAPTACIÓN DEL CÓDIGO C

Para tratar de implementar cualquier algoritmo en un dispositivo Zynq es suficiente partir de un código C de dicho algoritmo; en este caso la NFFT. El código debe ser adaptado para que SDSoC pueda manejarlo convenientemente.

A. *La NFFT*

En esta sección se describe brevemente el algoritmo NFFT que se desea implementar en el dispositivo Zynq, La NFFT calcula aproximaciones de sumas de:

$$f(x_j) = \sum_{k=-N/2}^{\frac{N}{2}-1} \hat{f}_k e^{-2\pi i k x_j}, \; j = 1,\ldots,M \qquad (1)$$

en nodos arbitrarios $x_j \in [-1/2,1/2)$. Para el cálculo eficiente se recurre a la aproximación de un polinomio trigonométrico que emplea una función ventana φ, un factor de sobremuestreo σ y un parámetro de corte m [2,5,6]. Este cálculo aproximado de $f(x_j)$ involucra los pasos que se describen a continuación:

- Paso 1 (Deconvolución): para los k coeficientes complejos de entrada $\hat{f}_k$,

$$\hat{g}_k = \frac{\hat{f}_k}{c_k(\tilde{\varphi})} \qquad (2)$$

- Paso 2 (Transformada rápida de Fourier, FFT): se calcula para l puntos, empleando los coeficientes obtenidos en el paso anterior,

$$g_l = \frac{1}{n} \sum_{l \in I_n} \hat{g}_k e^{-2\pi i k l / n}, n = \sigma N \qquad (3)$$

- Paso 3 (Convolución): para los M puntos donde se desea evaluar la transformada, $j=0,\ldots,M-1$, se calcula con una versión periódica de la función ventana, $\tilde{\psi}$:

$$f_j = \sum_{I_{n,m}(x_j)} g_l \tilde{\psi}(x_j - \frac{l}{n}) \qquad (4)$$

Para mantener pequeño el error de la aproximación, debe seleccionarse una función ventana φ bien conocida en ambos dominios transformados. Varias de estas funciones han sido propuestas en [5,7,8].

B. *Adaptación del código C de la NFFT*

La herramienta SDSoC requiere que las partes del código que la NFFT o cualquier algoritmo que sea susceptible de implementar en hardware debe estar explícitamente en una función. Así, se modificó el código C de partida para conformar en tres funciones los pasos descritos en el apartado anterior: deconvolución, FFT y convolución (figura 1).

De esta manera, cada módulo fue implementado C como una función independiente. Esto va a permitir que podamos tratar de implementar en hardware las funciones una o una o todas a la vez.

En cada una de las funciones se añaden una serie de *pragmas*, o directivas al SDSoC. Se usan para optimizar la implementación hardware usando pipeline, desenrollos de bucles, particionado de array de datos, etcétera. Los *pragmas* sirven para explorar micro-arquitecturas que satisfagan los objetivos de rendimiento y ocupación en la parte de lógica configurable del chip. Se han usado tres *pragmas* en las funciones de la NFFT.

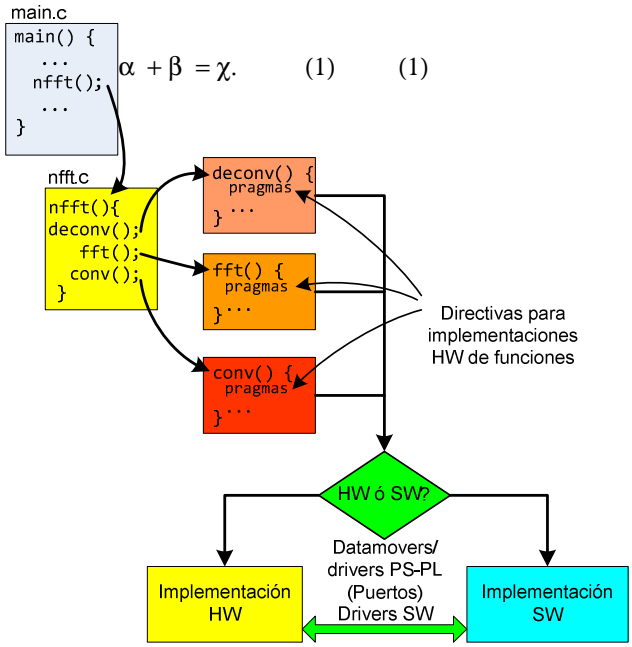


Fig. 1. Estructura del código C adaptado a SDSoC

El *pragma* de desenrollamiento de bucles se ha usado en los bucles de las tres funciones para desenrollar y crear varias operaciones simultáneas en lugar de implementar un único operador. Esto crea varias copias del cuerpo del bucle y ajusta el contador de iteraciones en consonancia. Hay que tener en cuenta que más paralelismo supone mayor productividad (throughput en inglés) y mayor velocidad de cómputo, pero el empleo de más recursos hardware. El *pragma* de pipeline supone otra técnica para explotar el paralelismo en las iteraciones de los bucles. Permite implementar las operaciones del bucle de una manera concurrente como la mostrada en la figura 2. Debe especificarse un intervalo de iniciación, que detalla el número de ciclos de reloj entre los comienzos de iteraciones del bucle consecutivas.

Por último, el *pragma* de acceso a datos se ha usado al comienzo de las tres funciones para permitir la implementación de un acceso streaming de arrays de datos en una transferencia. Con esto se evita la implementación no deseada de memoria compartida, normalmente implementada en una memoria DDR externa de la lógica programable para arrays de datos grandes.

III. Descripción de la tecnología y metodología

En esta sección se describe la plataforma hardware Zynq usada para la implementación del algoritmo. Además, se describe la herramienta de desarrollo SDSoC que se ha empleado en la etapa de diseño.

.

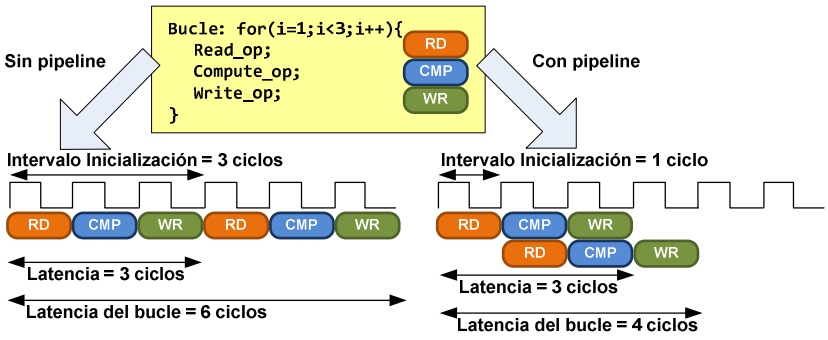


Fig. 2. Ejemplo de hacer pipeline en un bucle. La productividad (throughput) del bucle aumenta.

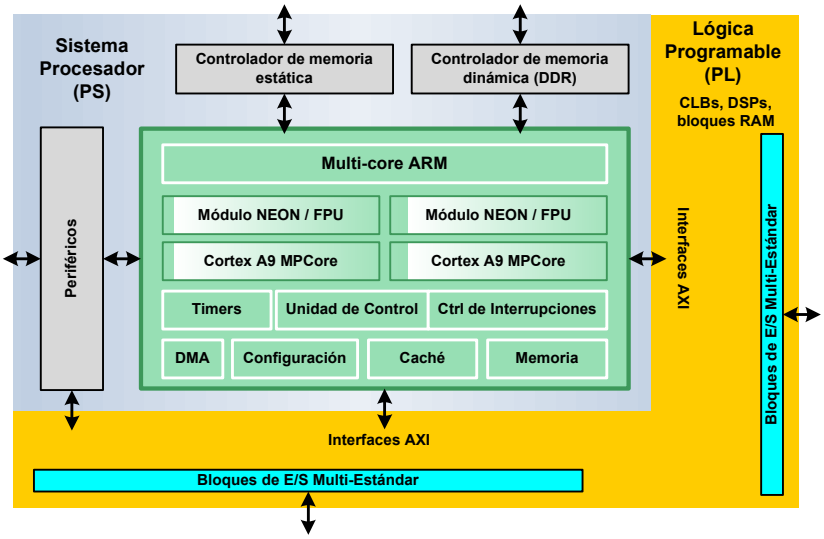


Fig. 3. Arquitectura simplificada del dispositivo Zynq 7020.

A. *La plataforma hardware*

El prototipo se implementó en una tarjeta de desarrollo Zedboard [9]. Lo más relevante de la misma es el dispositivo Zynq-7020 [10]. Básicamente, Zynq es un dispositivo que combina procesador dual-core ARM Cortex-A9 [11] con una región con los componentes típicos de una FPGA, en lo que Xilinx, el fabricante, ha bautizado como APSoC (All programmable system-on-chip) [12].

La arquitectura general de un dispositivo de estas características contiene dos regiones: un sistema de procesador (Processing System – PS) y la lógica reconfigurable (Programmable Logic – PL). Un esquema de su arquitectura se muestra en la Figura 2. Ambas regiones se pueden usar de manera independiente o conjuntamente.

El procesador es un procesador hardware dual-core ARM Cortex, que es una alternativa hardware a los procesadores firmware tipo PicoBlaze o MicroBlaze que también maneja Xilinx [13, 14]. Estos procesadores se implementan usando los recursos genéricos de la propia FPGA, configurando procesadores muy flexibles. Los procesadores hardware son más rígidos, pero lo compensan un rendimiento considerablemente mayor.

Cada core del ARM tiene un motor de procesamiento NEON y una unidad de punto flotante (FPU) pensada para realizar tareas de cómputo. La Unidad de Control realiza tareas relacionadas con la interfaz entre los procesadores y la memoria caché. También gestiona las transacciones que tienen lugar entre el procesador y la lógica programable. El ARM opera con un reloj de 866 MHz [12].

Por otra parte, la parte FPGA del dispositivo Zynq-7020 se basa en la familia Artix-7 de Xilinx, y se muestra en la figura 3. Esta parte es una red de bloques lógicos configurables (CLBs) compuestos, a su vez, por dos slices. Estos elementos se conectan entre sí a través de interconexiones programables y matrices de conmutación. Dentro de cada slice, 4 memorias del tipo 6-LUT son capaces de implementar funciones de hasta 6 variables, memorias distribuidas o registros de desplazamiento.

Cada slice incluye también 8 flip-flops para implementar circuitos secuenciales. Zynq-7020 tiene 53200 6-LUTs y 106400 flip-flops [12].

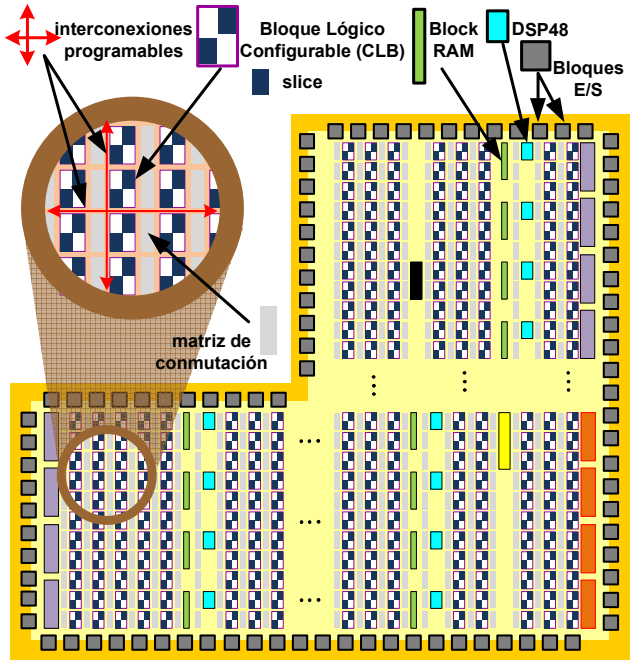


Fig. 4. La región reconfigurable de la Zynq-7020 y sus elementos básicos.

Además de esta lógica genérica, la zona FPGA contiene algunos components específicos, como Block RAMs para requerimientos de mayor almacenaje que la memoria distribuida de los slices y bloques DSP48 para aritmética de alta velocidad. Este componente tiene un pre-sumador/restador, un multiplicador y un post-sumador/restador, resultando un módulo muy versátil. Todos estos elementos se encuentran embebidos en la red de componentes de la FPGA. Zynq-7020 tiene 140 36Kb Block RAMs y 220 módulos DSP48 (18 x 25 bit) [12].

B. Metodología de diseño con SDSoC

Como se ha comentado, el dispositivo Zynq está conformado por una parte de procesador y otra de lógica reconfigurable. Así, este dispositivo híbrido es capaz de integrar las ventajas de ambas tecnologías en un único chip. La parte PS se puede encargar de las rutinas software, GUIs o un sistema operativo que controle tareas y aplicaciones (incluyendo procesado de datos); y la parte PL, de implementar eficientemente algoritmos altamente paralelizables. Estos algoritmos contienen operaciones matemáticas que deben realizarse para un gran número de muestras simultáneamente, en las que las implementaciones software suponen un cuello de botella. El algoritmo NFFT forma parte de este tipo de algoritmos.

La metodología clásica de co-diseño HW/SW empleada hasta ahora, con procesadores firmware tipo MicroBlaze se ilustra en la figura 5 [15]. El ingeniero debía identificar cada uno de los subsistemas del diseño y decidir apropiadamente qué partes implementar en hardware y cuáles en software de forma manual. La comunicación entre las partes del sistema tenía que ser definida. Así, Vivado se empleaba para el desarrollo de los componentes hardware, mientras que la herramienta SDK se encargaba de la programación software. Vivado puede incluir módulos VHDL/verilog, desarrollados con System Generator, también permite descripciones de alto nivel con Vivado HLS y también se puede recurrir a un extenso catálogo IP o IPs comerciales. Por su parte, SDK incluye drivers para los IPs, soporte de librerías para ARM y NEON usando C y C++, y herramientas de depuración y *profiling*.

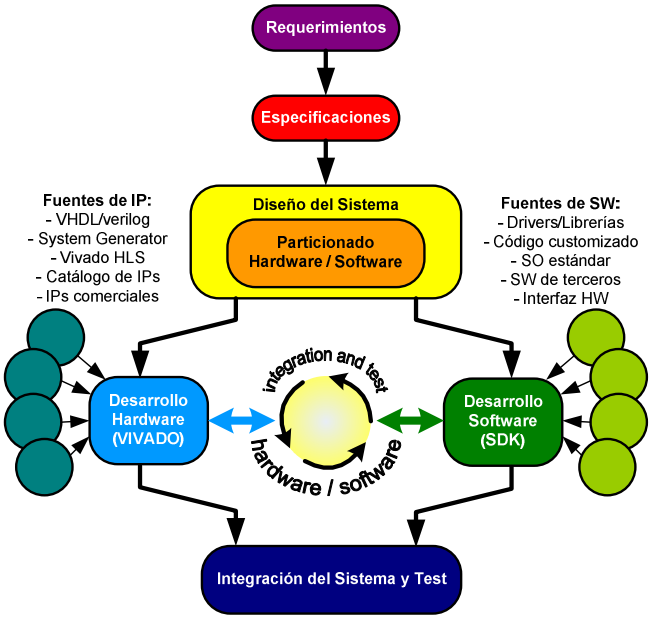


Fig. 5. Flujo de co-diseño hardware/software tradicional.

Seleccionar desde el inicio del diseño un buen particionado entre el hardware y el software es clave y debe realizarse en etapas muy temprana en la fase de diseño Es por ello que el ingeniero, por lo general, tarde o temprano, debe refinar y mejorar este particionado, y no es tarea baladí. Así, estos cambios en el diseño son del todo indeseables y a evitar, porque retrasan significativamente el desarrollo del proyecto.

La reciente herramienta SDSoC automatiza y simplifica el particionado y la interfaz entre el hardware y el software. Para ello únicamente es necesario un algoritmo escrito en C ó C++ con una serie de directivas en las partes que se desea implementar en la región de lógica programable del dispositivo Zynq. Evidentemente, esto permite al ingeniero probar varias alternativas de diseño de una manera rápida y sencilla.

La metodología de diseño con SDSoC se muestra en la figura 6 [16]. Simplemente, el usuario selecciona qué funciones desea implementar en hardware con el único requisito que cada función debe estar codificada en su propio fichero C. La herramienta incluso es capaz de analizar qué funciones son las más adecuadas para su implementación hardware por medio de la herramienta de profiling. Esto constituye lo que se denomina exploración de macro-arquitecturas. A continuación, cada función a hardware es refinada usando las directivas que ya han

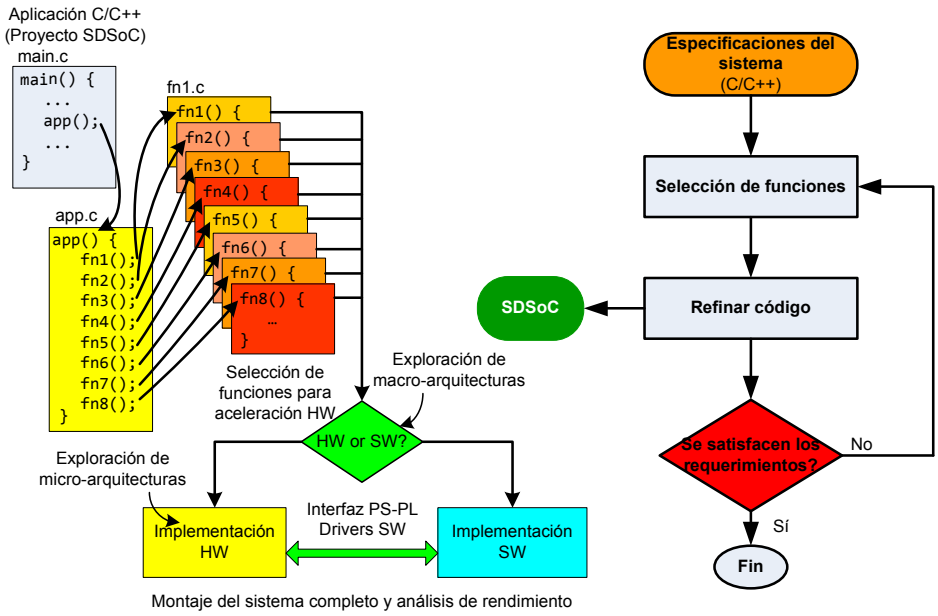


Fig. 6. Esquema de la metología de diseño usando SDSoC.

sido comentadas en el apartado anterior, con el fin de buscar su implementación óptima (análisis de micro-arquitecturas).

IV. Caso de estudio: implementación de la NFFT

En el caso de la implementación de la NFFT tenemos por separado tres funciones susceptibles a ser pasadas a hardware: las etapas de deconvolución, FFT y convolución (figura 7).

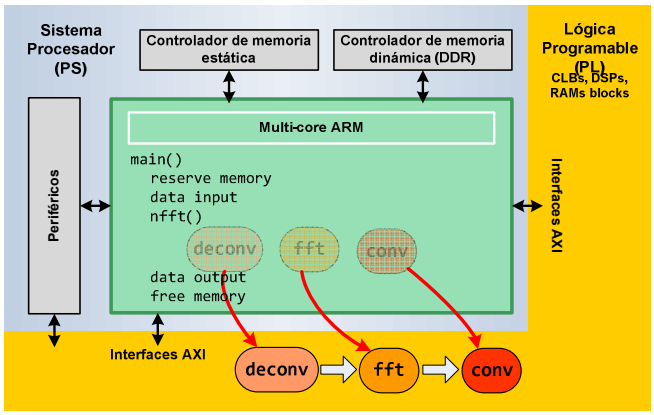


Fig. 7. Aceleración HW/SW del código C de la NFFT con Zynq. Se pueden seleccionar una, dos o las tres funciones para ser implementadas en HW.

Para evaluar la bondad de la herramienta sobre el algoritmo de la NFFT, para cada función, de manera independiente, se ha implementado una solución hardware y otra software. También se ha analizado el algoritmo NFFT completo de la misma manera. La función ventana seleccionada para la NFFT ha sido la función gaussiana φ, el factor de sobremuestreo σ igual a 2 y el parámetro de corte m igual a 6.

La Tabla 1 muestra los resultados de las soluciones SW y HW para el módulo deconvolución. Estos resultados han sido calculados para un número de muestras variable de 32 hasta 1024 en potencia de 2. Se muestra los ciclos de reloj para el cálculo de esta fase, así como el porcentaje de recursos que han sido necesario. Puede apreciarse que la solución hardware mejora la alternativa software hasta un factor 37 para 1024 muestras.

Para la FFT se ha repetido el estudio, obteniéndose una mejora significativa entre ambas soluciones. En este caso, se obtiene una aceleración de hasta 380 para 1024 puntos (Tabla 2). En cambio, los resultados para el módulo de convolución no mejoran apreciablemente, con una aceleración de 1.2 (Tabla 3). En este caso, si se quisiera mejorar la eficiencia, habría que describir la arquitectura a más bajo nivel (empleando VHDL), que no se ha considerado, por no formar parte del objetivo de este trabajo. El hecho de obtener tan pobres resultados en este módulo puede explicarse por el acceso irregular de datos en la convolución de la ecuación (3), no pudiendo usar los mecanismos de SDSoC para acceso a memoria contigua usando las directivas *sds alloc* y *sds free*. Esto causa acceso múltiple a direcciones de memoria no contigua y, consecuentemente, la velocidad del coprocesador hardware se reduce significativamente.

TABLE I. ACELERACIÓN DE LA FUNCIÓN DECONVOLUCIÓN

Número de puntos	Solución Software			Solución Hardware			Aceleración del algoritmo
	Ciclos CPU	*% PS[a]*	*% PL[b]*	*Ciclos CPU*	*% PS[a]*	*% PL[b]*	
32 (2^5)	265,328	24.6%	0.0%	14,562	4.1%	19.7%	18.11
64 (2^6)	278,355	24.9%	0.0%	14,763	4.3%	20.0%	18.85
128 (2^7)	304,407	25.3%	0.0%	14,983	4.5%	20.6%	20.32
256 (2^8)	356,512	26.2%	0.0%	15,423	4.9%	21.7%	23.12
512 (2^9)	460,722	27.8%	0.0%	16,303	5.7%	23.9%	28.26
1024 (2^{10})	669,142	31.1%	0.0%	18,064	7.4%	28.3%	37.04

[a.] Procentaje del Sisteme de Procesador PS empleado (ARM)

[b.] Porcentaje de Lógica Programable PL empleado (FPGA)

TABLE II. ACELERACIÓN DE LA FUNCIÓN FFT

Número de puntos	Solución Software			Solución Hardware			Aceleración del algoritmo
	Ciclos CPU	*% PS[a]*	*% PL[b]*	*Ciclos CPU*	*% PS[a]*	*% PL[b]*	
32 (2^5)	252,298	25.2%	0.0%	7,844	4.1%	23.4%	32.16
64 (2^6)	342,447	25.5%	0.0%	7,849	4.3%	23.8%	43.63
128 (2^7)	522,744	25.9%	0.0%	7,859	4.5%	24.6%	66.52
256 (2^8)	883,339	26.7%	0.0%	7,880	4.9%	26.2%	112.10
512 (2^9)	1,604,528	28.4%	0.0%	7,919	5.7%	29.4%	202.62
1024 (2^{10})	3,046,906	31.9%	0.0%	7,998	7.4%	35.7%	380.96

TABLE III. ACELERACIÓN DE LA FUNCIÓN CONVOLUCIÓN

Número de puntos	Solución Software			Solución Hardware			Aceleración del algoritmo
	Ciclos CPU	*% PS[a]*	*% PL[b]*	*Ciclos CPU*	*% PS[a]*	*% PL[b]*	
32 (2^5)	159,932	61.3%	0.0%	143,336	4.1%	54.5%	1.12
64 (2^6)	348,085	62.3%	0.0%	311,964	4.3%	55.1%	1.12
128 (2^7)	724,390	64.1%	0.0%	649,220	4.5%	55.9%	1.12
256 (2^8)	1,476,390	67.8%	0.0%	1,323,732	4.9%	57.7%	1.12
512 (2^9)	2,982,218	75.2%	0.0%	2,682,756	5.7%	61.2%	1.12
1024 (2^{10})	5,992,656	89.9%	0.0%	5,370,804	7.4%	68.3%	1.12

TABLE IV. ACELERACIÓN DEL SISTEMA ENTERO

Número de puntos	Solución Software			Solución Hardware			Aceleración del algoritmo
	Ciclos CPU	*% PS[a]*	*% PL[b]*	*Ciclos CPU*	*% PS[a]*	*% PL[b]*	
32 (2^5)	678,094	69.9%	0.0%	166,582	4.1%	61.5%	4.07
64 (2^6)	969,428	70.7%	0.0%	335,397	4.3%	62.5%	2.90
128 (2^7)	1,552,094	72.2%	0.0%	673,027	4.5%	64.4%	2.31
256 (2^8)	2,717,426	75.3%	0.0%	1,348,287	4.9%	68.6%	2.02
512 (2^9)	5,048,090	81.4%	0.0%	2,698,807	5.7%	76.9%	1.87
1024 (2^{10})	9,709,418	93.6%	0.0%	5,399,846	7.4%	91.3%	1.80

Por último, la Tabla 4 muestra la mejora lograda cuando los tres módulos fueron seleccionados para su aceleración en hardware. Para todas las longitudes de datos, la solución hardware mejora a software, obteniéndose aceleraciones de 1.80 a 4.07. En este caso particular, la aceleración del peor módulo pasado a hardware (módulo de convolución), se compensa con la aceleración obtenida en los otros dos módulos.

V. CONCLUSIONES

Se ha conseguido que un alumno con unas nociones elementales de VHDL y diseño de circuitos electrónicos con FPGA realice de una manera fácil e intuitiva un análisis de varias alternativas de co-diseño HW-SW en una plataforma híbrida Zynq.

En concreto, se ha realizado una implementación eficiente del algoritmo de la NFFT usando dicha plataforma que incluye una parte de procesador y una parte de lógica programable tipo FPGA.

El uso de la herramienta *profiling* del entorno de desarrollo SDSoC, junto con los *pragmas* insertados en el código C nos permitió detectar los cuellos de botella del algoritmo y mejorar su ejecución.

Computacionalmente, el uso de esta tecnología muestra una mejora importante cuando es posible el empleo de una interfaz de datos en forma *streaming*. Para este caso en particular, es posible obtener aceleraciones de 380 en el cálculo de la FFT. El acceso irregular del último módulo hace que el SDSoC no elija la interfaz óptima y el resultado final se resiente bastante.

No obstante, nuestro principal objetivo en este trabajo consistió en explorar el potencial del empleo de la herramienta SDSoC para implementar algoritmos complejos en hardware sin recurrir a una descripción VHDL, abriendo el camino del uso de esta metodología en futuros Trabajos Fin de Grado.

REFERENCES

[1] E. Magdaleno, B. Rodríguez, M. Rodríguez, "Guía Docente de Sistemas Electrónicos Digitales", Grado en Ingeniería Informática, Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología, 2018. Disponible en: https://e-guia.ull.es/etsii/query.php?codigo=139261024 (accedido el 19/02/2018).

[2] D. Potts, G. Steidl, M. Tasche, "Fast Fourier transforms for nonequispaced data: A tutorial", en Modern Sampling Theory: Mathematics and Applications; Benedetto, J., Ferreira, P., Eds.; Birkhäuser: Boston, MA, USA, 2001; pp. 247–270.

[3] T. Knopp, S. Kunis, D. Potts, A note on the iterative MRI reconstruction from nonuniform k-space data. Int. J. Biomed. Imaging 2007, 6, pp. 4089–4091.

[4] A.J.W. Duijndam, M.A. Schonewille, "Nonuniform fast Fourier transform", en Geophysics 1999, 64, pp. 539–551.

[5] H. Schomberg, J. Timmer, "The Gridding method for image reconstruction by Fourier transformation" en IEEE Trans. Med. Imaging 1995, 14, pp. 596–607.

[6] A. Dutt, V. Rokhlin, "Fast Fourier transforms for nonequispaced data" en SIAM J. Sci. Comput. 1993, 146, pp. 1368–1393.

[7] J.A. Fessler, B.P. Sutton, "Nonuniform fast Fourier transforms using min-max interpolation" en IEEE Trans. Signal Process. 2003, 51, pp. 560–574.

[8] S. Kunis, D. Potts, G. Steidl, "Using NFFT 3 – A sofware library for marious nonequispaced fast Fourier transforms en ACM Trans. Math. Softw. 2009, 36, 19.

[9] Avnet. Zedboard (Zynq Evaluation and Development) Hardware User's Guide. Version 2.2. 2014. Available online: http://zedboard.org/sites/default/files/documentations/ZedBoard_HW_UG_v2_2.pdf (accedido el 2 de noviembre 2016).

[10] Xilinx. Zynq-7000 All Programmable SoC. Technical Reference Manual. UG585 (v1.11). 2016. Available online: https://www.xilinx.com/support/documentation/user_guides/ug585-Zynq-7000-TRM.pdf (accedido el 2 Noviembre 2016).

[11] ARM. Cortex-A9 MPCore Technical Reference Manual. Revision r4p1. 2012. Available online: https://static.docs.arm.com/ddi0407/i/DDI0407.pdf (accedido el 2 Noviembre 2016).

[12] Xilinx. Zynq-7000 All Programmable SoC Overview. DS190 (v1.10). 2016. Available online: https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds190-Zynq-7000-Overview.pdf (accedido el 2 Noviembre 2016).

[13] K. Chapman. PicoBlaze for Spartan-6, Virtex-6, 7-Series, Zynq and UltraScale Devices (KCPSM6). Release 9. 2014. Available online: https://www.xilinx.com/ipcenter/processor_central/picoblaze/member/ (accedido el 2 Noviembre 2016).

[14] Xilinx. LogiCORE IP MicroBlaze Micro Controller System (v1.1). DS865. 2012. Available online: https://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx14_1/ds865_microblaze_mcs.pdf (accedido el 2 Noviembre 2016).

[15] L.H. Crockett, R.A. Elliot, M.A. Enderwitz, R.W. Stewart, "Designing with Zynq" en The Zynq Book: Embedded Processing with the ARM Cortex-A9 on the Xilinx Zynq-7000 All Programmable SoC, 1st ed.; Strathclyde Academic Media: Scotland, UK, 2014; pp. 47–75.

[16] Xilinx. SDSoC Environment User Guide. UG1027 (v2016.2). 2016. Available online: https://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx2016_2/ug1027-sdsoc-user-guide.pdf accedido el 3 Noviembre 2016).

Low cost magnetic simulator for attitude control

Mario Castro Santiago[1], Luis Sánchez Velasco[2]
GranaSAT Aerospace Group University of Granada
Granada, Spain
[1]mario.cs.96.az@gmail.com, [2]hfegetude@gmail.com

Andrés Roldán Aranda
Electronics Department
University of Granada
Granada, Spain
amroldan@ugr.es

***Abstract*—The aim of this paper is to propose an aerospace project, in order to allow Master's Space students to put in practice their knowledge in physics, which can be crucial in this engineering area. Here, we face the attitude control issue of a cubesat, using a physical 1U satellite model and a magnetic field simulator, combined with real data from a desired orbit. The satellite model will use magnetorquers controlled by an Arduino board, in the same way as the magnetic simulator.**

Keywords—Aerospace application; magnetic field simulator; attitude control; cubesat magnetorquer

I. INTRODUCTION

Nowadays, Physics knowledge can play an important role in the aerospace environment, since it provides an overall vision of many aspects in a space mission. For instance, reduce the roll rate in a satellite after its orbital insertion is a necessary step for any mission. One can achieve this by using magnetic actuators, called magnetorquers, which are a low cost and mass solution, particularly in small cubesats at LEO (Low Earth Orbit).

In point of fact, the problem faced here would be part of the so-called ADCS (Attitude Determination and Control System) of a satellite, a very relevant part of Aerospace Engineering since, even there are some space mission that do not require neither spacecraft active stabilization nor orientation, this is not the case of many satellites which need a certain degree of pointing. For instance, the usage of directional antennas, cameras or some sensors, forces engineers to undertake this issue. Although there exist plenty of literature about this, some crucial references are [1], [2] and [3].

A unique satellite manufacturing standard made it appearance in 1999 by the hand of California Polytechnic State University, San Luis Obispo and Stanford University's Space Systems Development Lab, in order to ease access to space by university students [4]. This was called Cubesat. As its name suggest, Cubesats are modular satellites made of 10x10x10 cm cubes. Depending of the number of cubes, they are called 1U, 2U, 6U… being U the 1000 cm^3 volume unit.

Here, we will provide methods for testing magnetorquers and control algorithms, using a simple magnetic simulator [5] and a 1U cubesat prototype, both controlled by different Arduino ATMega2560. In addition, the cubesat model will contain an inertial measurement unit (IMU), which provides real-time attitude information to its Arduino board (also called On-Board Computer, OBC). All scripts will be written in C++, taking into account the memory limit of Arduino Mega boards.

II. PROJECT GENERAL APPROACH

Although his project comprises many steps, they may be all included in two groups: simulation and physical implementation.

A. Simulation

Simulation tasks are the basis of the whole project. They are not only the framework of the expected testing results, they also allow us to design, configure or improve control algorithms. Two things have to be modeled: a satellite and an orbit around Earth. The satellite attitude and position will be simulated both in MATLAB and AGI STK (System Tool Kit) [6], a widely used Aerospace Software which will validate some aspects of our simulation.

Concerning the satellite, a 3D model must be provided to STK, which is discussed in Section III. Since magnetorquers are used as actuators, we should define too their properties (in Section VIII, some values are given). Providing a control algorithm is crucial too: B-dot algorithm [7] is a simple way of stabilization, and that why it is the chosen here, as a first step of ADCS designing (Section V). When it comes to orbit simulation, we have to propagate the satellite's trajectory and compute the magnetic field existing in that orbit (Section IV).

B. Physical implementation

This part involves two tasks: sensor calibration and porotype testing. In this case we only calibrate the magnetometers of the IMU, and this process is described in Section VII. Finally, having building a prototype, it can be tested inside the magnetic simulator. The satellite must send information about its angular speed to a computer in order to compare with graphs obtained in simulations.

Fig.1 schematizes the general process.

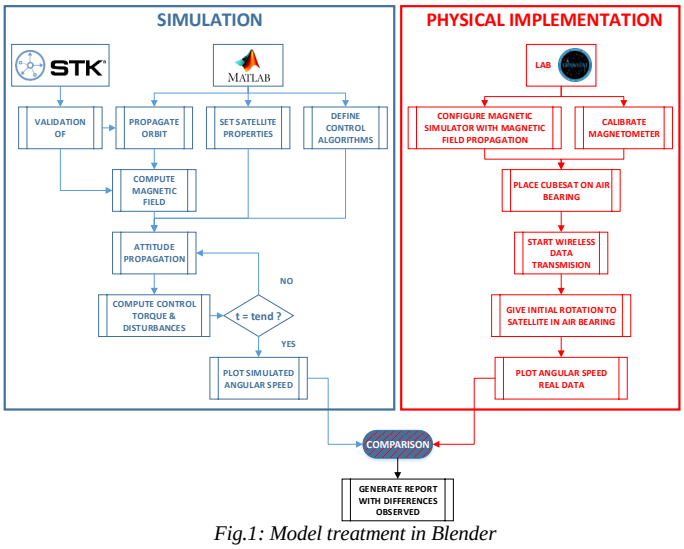


Fig.1: Model treatment in Blender

III. DESIGN OF A 3D CUBESAT MODEL

A. *General proceedings*

The first global part of this project consists on modeling a 3D model of our cubesat, in order to use it in STK software. The whole process is summarized in Fig.2, and a manual is found in [16].

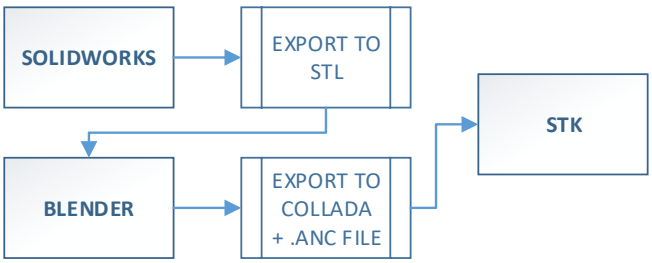


Fig.2 Flow chart of the design process

B. *Cubesat design in SolidWorks*

First of all, we need to create our model in *SolidWorks*. This model should be as simple as possible: we do not need screws, batteries, circuits, etc. If you are using a CAD file with a real satellite, with all those internal parts, they must be disabled or removed. After this process, we export a STL file with our model, just containing the "skeleton" and solar panels.

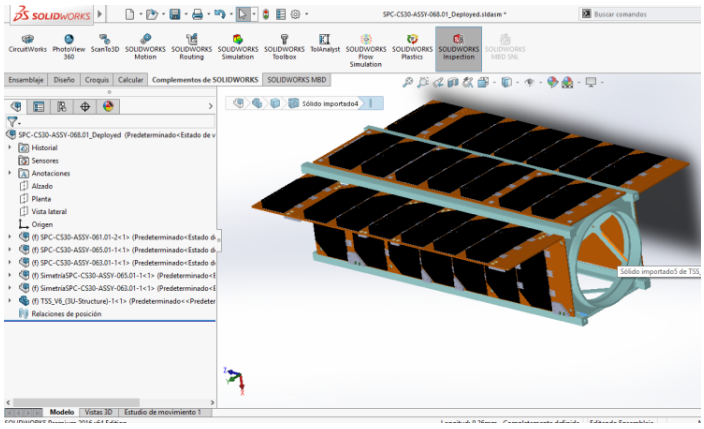


Fig.3: Cubesat modeling in SoliWorks

C. *Creating COLLADA model by Blender*

Our STL file is not ready for using it in STK yet. We need to group the cubesat parts in at least two types: solar panels and the rest. It is important, since later, STK will need to know which parts of the model (specifically, their area and solar efficiency) are photovoltaic panels. Moreover, our models can have mobile parts, called "articulations", e.g, foldable panels, like the ones shown in Fig.3. After grouping all these parts in "layers" in Blender, Fig.4, we can export a COLLADA (.dae) file. Before loading it in STK, an "ancillary" file (.anc) must be written, containing information about degrees of freedom each part has for motion, sensor attachment points, pointing directions of moving parts.

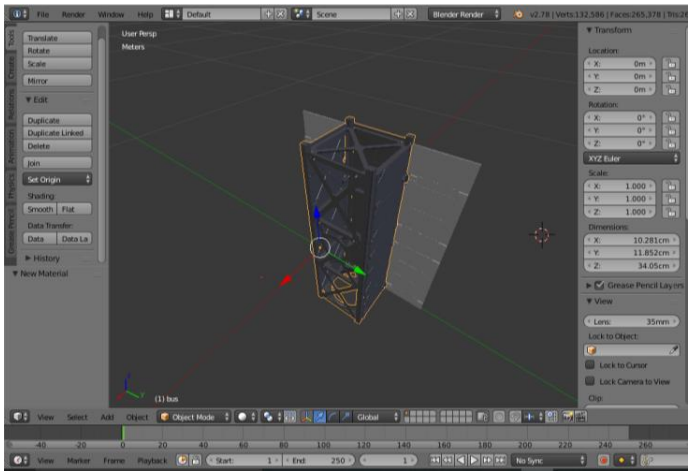


Fig.4: Model treatment in Blender

D. *Loading model in STK*

After generating a .dae file, and writing a .anc file, we can load our model in STK, Fig.5, which will recognize solar panels and articulations, as we have defined them before.

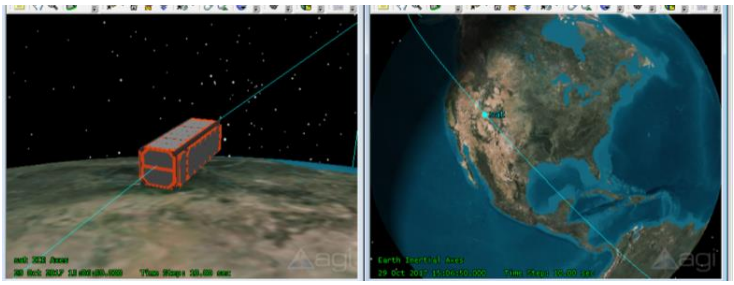


Fig.5: Model loaded in STK

IV. PROPAGATING ORBIT AND MAG. FIELD

In order to generate a real magnetic field vector inside the simulator, the orbital trajectory of the satellite must be propagated. There are several algorithms to achieve this; here, SGP4 [8] is implemented in C++. We have write it both in the simulator board and in the OBC, since in future steps, the satellite will need to estimate its position in order to improve attitude control by the use of Kalman filter. Thereby, simulator receives real orbital position, so it can compute magnetic field by the use of IGRF [9] model, which estimates it in some given coordinates in ECI (Earth-Centered Inertial) frame, i.e a reference frame with its center locater in Earth origin and does not rotate. Finally, Helmholtz coils generates this magnetic vector. This process is summarized in Fig.6.

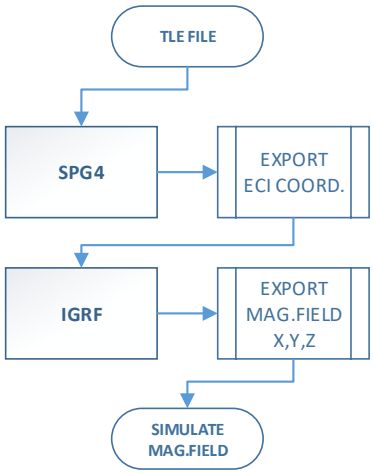


Fig.6: Propagation process flow chart

A. *SGP4 implementation*

The input necessary when propagating a spacecraft orbit is called TLE (Two eLement Set). It is a text document which contains a list of orbital elements in a specific time (epoch). The SGP4 algorithm (code in [10]) uses these data to estimate (both in the past and future) the trajectory of de satellite. In order to validate the effectivity of our SGP4 implementation, we propagated ISS trajectory both in STK and MATLAB. Results are shown in Fig.7a-b. The small differences between both propagations allow us finally write SGP4 algorithm in C++.

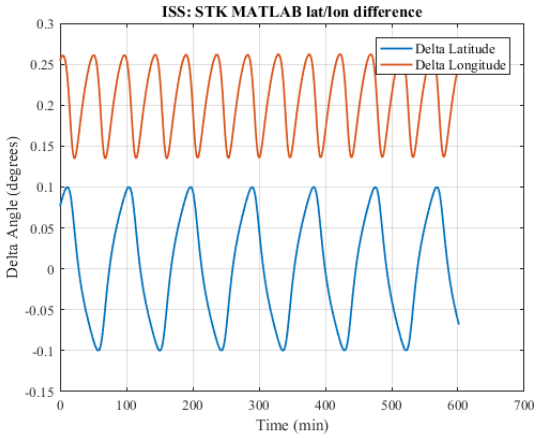


Fig.7a: STK versus MATLAB propagated lat/lon difference

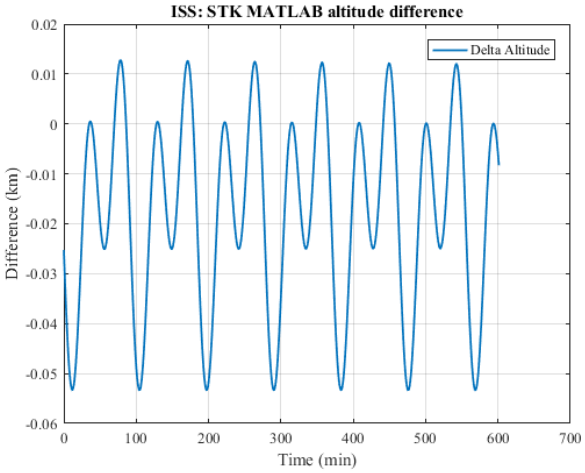


Fig.7b: STK versus MATLAB propagated altitude difference

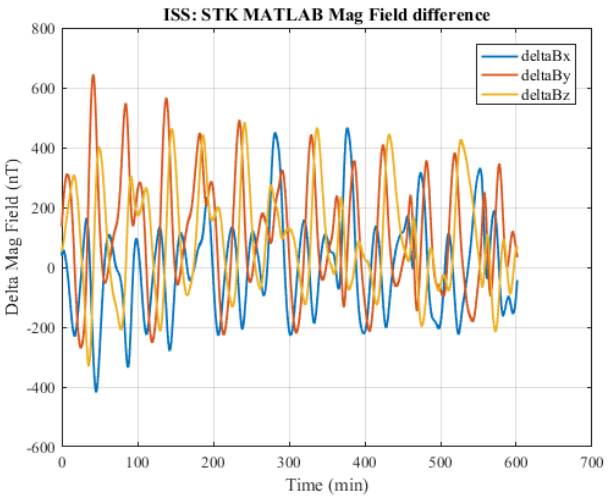


Fig.8: STK versus MATLAB propagated magnetic field difference

B. *IGRF implementation*

Next step consists on compute magnetic field in spatial points propagated by SGP4. Again, we first wrote MATLAB code for testing this algorithm (code can be found in [11]), and then compared it with STK magnetic field estimation. Results are shown in Fig.8. Finally, IGRF program was written in C++.

V. ATTITUDE CONTROL ALGORITHM

Although there exist many control algorithms, here we have implemented the well-known B-dot algorithm. It is briefly described in this section, as well as its implementation.

A. *B-dot: physics*

The effectivity of this method is based on the fact that magnetic field time derivative vector, i.e, the rate change of 3 magnetic field components, can be written as:

$$\dot{\boldsymbol{B}} \approx \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{B} \qquad (1)$$

Where $\dot{\boldsymbol{B}}$ is the derivative vector mentioned before, $\boldsymbol{\omega}$ is the angular velocity vector of the satellite, and $\boldsymbol{B}$ is just the magnetic vector; all of them expressed in satellite body frame coordinates. So, if we need to reduce our angular speed, we need to create torque in its direction, but with opposite sense. This can be achieved by generating a magnetic moment vector ($\boldsymbol{m}$) in the form:

$$\boldsymbol{m} = -\alpha\ \dot{\boldsymbol{B}} \qquad (2)$$

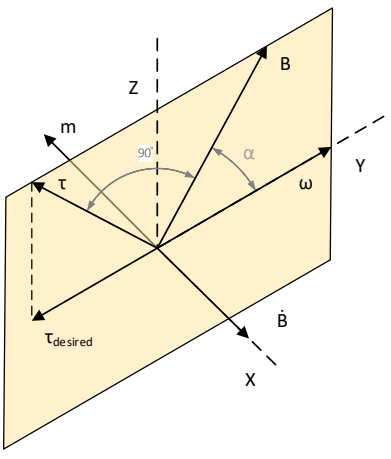


*Fig.9: All vectors are in the same plane (ZY) except **m** and $\dot{\boldsymbol{B}}$*

Where α is just a constant. Taking into account the expression of the torque (***T***) created by a magnetic dipole:

$$\boldsymbol{T} = \boldsymbol{m} \times \boldsymbol{B} \quad (3)$$

Then, generating ***m*** with magnetorquers, we are creating a component of torque which has equal direction as ***ω*** but opposite sense: we are reducing the angular speed rate. The relation between vectors named here can be seen in Fig.9

B. *Implementation*

The B-dot algorithm implies that we have to compute the derivative of the magnetic field. We can estimate it with consecutive measurements of ***B(t),*** and just applying the derivation concept:

$$\dot{\boldsymbol{B}} = [\boldsymbol{B}(t+dt) - \boldsymbol{B}(t)]/dt \quad (4)$$

Where *dt* is the time between two measurements going to zero. Since we need to now the intensity values in each coil (actually, we use PWM for "change" current), we need to use equation (5):

$$\boldsymbol{I} = \boldsymbol{m}/(An) \quad (5)$$

Where *A* is the area of the coil, and *n* the number of turns. Finally, we can solve for intensity thanks to (2). The constant α works as a gain factor; here we use α = 1E-5. The OBC will carry on this algorithm, sending to the coil the right amount of intensity.

VI. PHYSICAL IMPLEMENTATION

A. *Testbed*

We make use of a testbed (Fig.10), which injects air to a hemisphere containing the cubesat model. This way, the hemisphere rates free, since there are not frictional forces. Places inside this device, the satellite model is located inside the magnetic simulator. Once the air is circulating, a slight touch to the satellite is enough for it to continue rolling indefinitely.



Fig.10: The testbed (grey cylinder) inside the mag. simulator

B. *Monitorizating variables*

Onboard sensors are able to measure 3D angular speed, acceleration, magnetic field and also temperature. These data (telemetry) are sent with the aid of a low cost commercial wireless serial module (Fig.11), directly from the OBC to an external computer. This allows us to know attitude parameters in real time.



α

Fig.11: Wireless serial module with antenna. (eBay)

VII. MAGNETOMETER CALIBRATION

Before using the onboard magnetometer, it must be calibrated in order to get reliable measurements. Supposing we make a set of measurements with a correctly calibrated magnetometer, while we are rotating it along 3 spatial directions, we will be able to plot the magnitude of the local magnetic field in many directions, in a 3D graph. This set of points could be perfectly fitted by a sphere, with radius |***B***|, and centered in (0,0,0). However, commercial magnetometers are far away from this situation. Since we cannot modify them, we have to find a relation between the actual measurements, and the ideal ones. The process is briefly described in this section; fully geometrical interpretation and code can be found in [12].

α + β = γ (1) (1)

A. *Getting raw data*

The first step consists on make a relative large number of magnetic field measurements in many directions. This is achieved by connecting the IMU to an Arduino board, and serial-writing the magnetometer output in x, y, z directions. Then, we just have to copy a large number of rows in the serial monitor and save them in a .txt file.

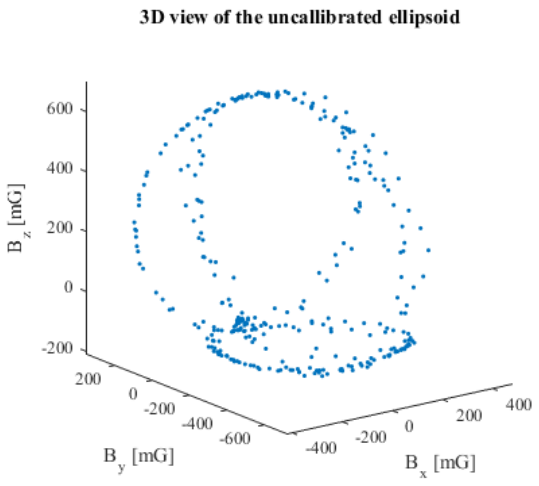


Fig.12: Raw magnetometer measurements

As shown in Fig.12, there are two basic issues: points do not form a sphere (it is an ellipsoid, this error is called soft iron), and they are not equally distributed around the origin

(there exists an offset, called hard iron). These differences with the ideal situation will be mathematically analyzed, and thus we will obtain some parameters with which raw measurements can be automatically transformed into more realistic magnetic field values.

B. *Calibration parameters with MATLAB*

Although is fully described in [11], the process followed in order to obtain calibration parameters is very intuitive. First, the location of the center of the ellipsoid is calculated, and this is essentially the offset (in three axis). The algorithm set the ellipsoid centered in that point. Then, the 3 principal axes of the ellipsoid are aligned with the x, y, z axis of the reference frame. Since they have different lengths, they must be scaled. This produces a sphere, which is then rotated so it has the original orientation of the ellipsoid. Finally, this sphere is scaled to a radius $|\boldsymbol{B}|$. The calibrated data is compared with the original ones in Fig.13. The hard iron effect is highly visible, since the centers of the both figures are obviously in different positions. The soft iron effect also appears in this graph: blue points form a sphere, red ones do not.

This process results in a 3 components vector $\boldsymbol{H_{cal}}$ (hard iron correction, i.e, the offset), and a 3x3 matrix $\boldsymbol{S_{cal}}$ (soft iron correction).

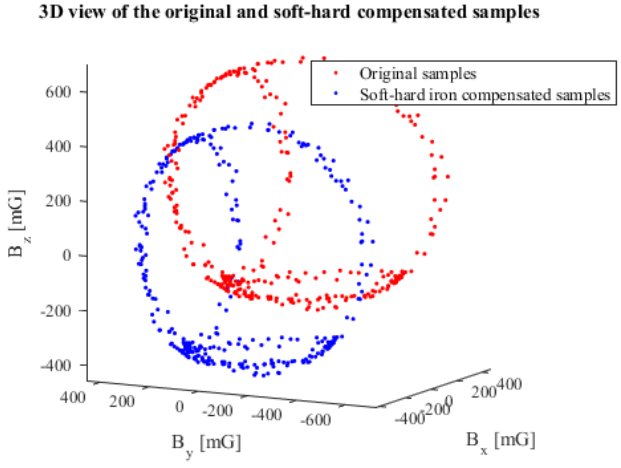


Fig.13: Calibrated (blue) and uncalibrated (red) points

C. *Applying the calibration*

Each time the cubesat measures the magnetic field, the raw measurements are transformed by the following relation:

$$\boldsymbol{B_{calibrated}} = \boldsymbol{S_{cal}} \cdot (\boldsymbol{B_{measured}} - \boldsymbol{H_{cal}}) \quad (6)$$

VIII. ATTITUDE CONTROL SIMULATION

Attitude control of the cubesat must be simulated via MATLAB before testing the prototype. In order to simulate the cubesat's attitude, we make use of a MATLAB toolbox called PROPAT [13], which integrates Euler's equations of motion, and takes into account external torque. This torque could be environmental (gravity, air drag…) or defined by the user, by a control law. As said before, we have implemented B-dot algorithm for this task. Although PROPAT can also propagate orbital position, we use SGP4 algorithm instead. Summarizing, the simulation process consists on (1) propagating orbital position (SGP4), (2) computing magnetic field for those positions (IGRF), (3) propagating attitude under B-dot control (PROPAT). Regarding to this control algorithm, we have test two different forms of operation: (1) applying continuous torque in each simulation step, and (2) generating intermittent torque, i.e, the cubesat is t_0 seconds unmanned, and t_1 seconds producing torque. As will be shown in VII-*B. Results*, this last method proves being more effective and less energy demanding.

A. *Cubesat parameters*

Table 1-3 contains the physical parameters of the cubesat and propagators used in the simulation.

Cubesat inertia matrix		
1/600 kg·m^2	0	0
0	1/600 kg·m^2	0
0	0	1/600 kg·m^2

Table 1: Inertia matrix corresponding to a 1 kg homogeneous 10 x 10 cm cube

Magnetorquers parameters			
Resistance	***Max Intensity***	***Turns***	***Area***
50 Ω	40 mA	40	0.0088 m^2

Table 2: Resistance, max. intensity, number of turns and area for each coil

Attitude and magnetic propagation		
Time	***Temporal step***	***Orbit modeled***
120 min	0.1 secs	ISS orbit

Table 3: Time, temporal step and type of orbit propagated

Must be highlighted that we have propagated ISS orbit (with TLE, or two-line element set [14], dating from 13th March), a station from which actual cubesats have been deployed.

B. *Results*

The simulation results prove that the magnetorquers are able to stabilize the satellite in less than two orbits, considering the initial angular speed given. *Fig.*14a shows that no component of angular speed is larger than 1 degree per second after the first orbit, and their values are basically zero after 1.5 orbits.

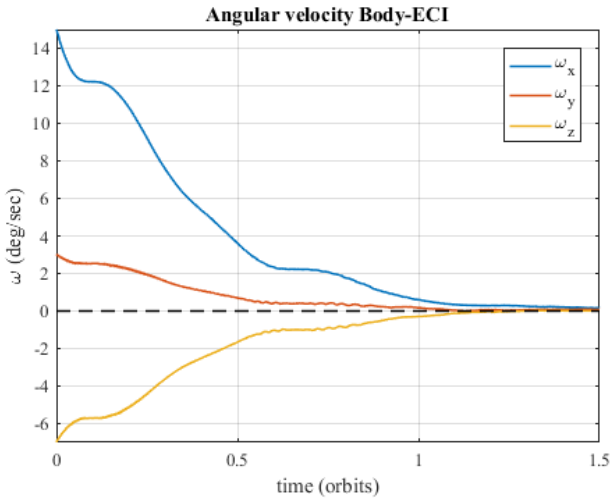


Fig.14a: Angular speed evolution in X, Y, Z axis

Energy consumption is shown in *Fig.*14b. It is clear than no more than 900 J are required for this task. This is understandable, even considering aerodynamical and gravity gradient torque that are simulated too. The first is very low, since 1U cubesat is a highly symmetrical tiny body.

Gravitational torque is even lower, due also to its symmetry and the fact that the satellite was considered a mass-homogeneous one.

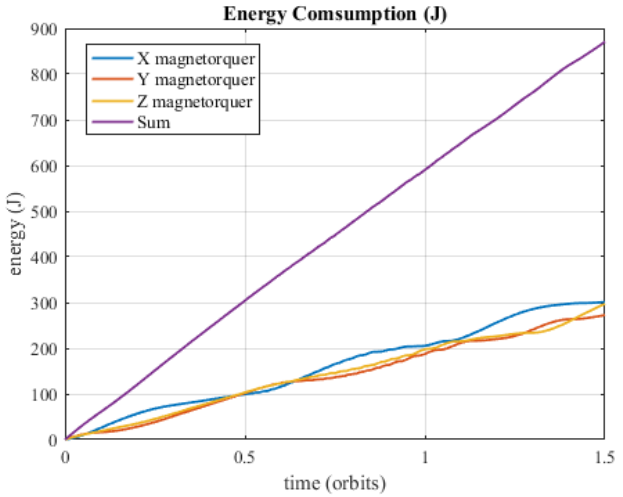


Fig.14b: Energy consumption evolution for each magnetor. and the sum of all

IX. STUDENTS APPROACH TO PROEJCT

The knowledge necessary to carry out this project should be presented to student in three sessions.

A. First session: theory

This section comprises physical and mathematical theory necessary to perform all simulations. Students should know how orbits are parametrized, and how IGRF model works. Attitude parametrization is also crucial, by the use of rotation matrices, Euler angles and quaternions. These geometrical elements play the same role concerning to reference frame transformation. In this project, only BODY and ECI frame are used. Contents are schematized in Fig.15.

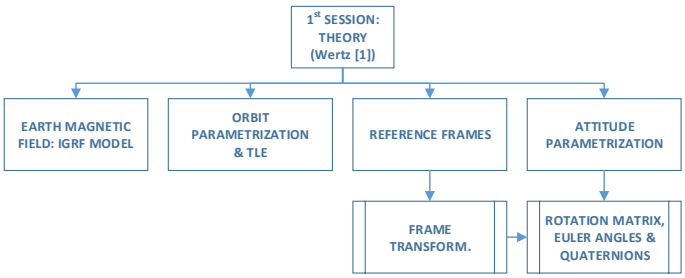


Fig.15: 1st Session contents

B. Second session: simulation

In this section, MATLAB software is given and explained to students: orbit, magnetic field and attitude propagation. B-dot algorithm should be implemented by students; they also could improve it by replacing basic derivative with a low pass filter [8] or using a more accurate estimation of the derivative. Contents are schematized in Fig.16.

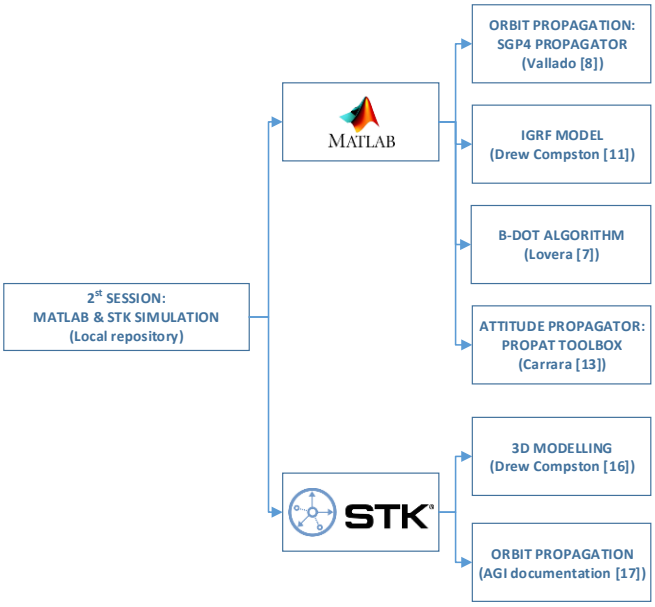


Fig.16: 2nd Session contents

C. Third session

In this section, C++ code required to be run in OBC is given. Furthermore, B-dot algorithm is implemented in the same way as it was in MATLAB. Contents are schematized in Fig.17.

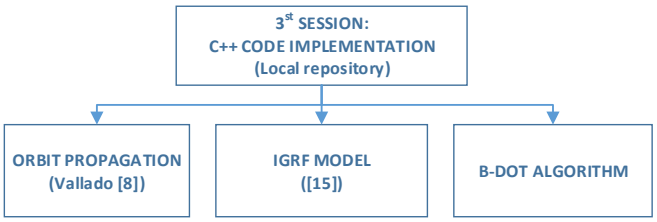


Fig.17: 3rd Session contents

X. STK FINAL TEST

B-dot algorithm is tested in STK environment and an orbital propagation video is generated.

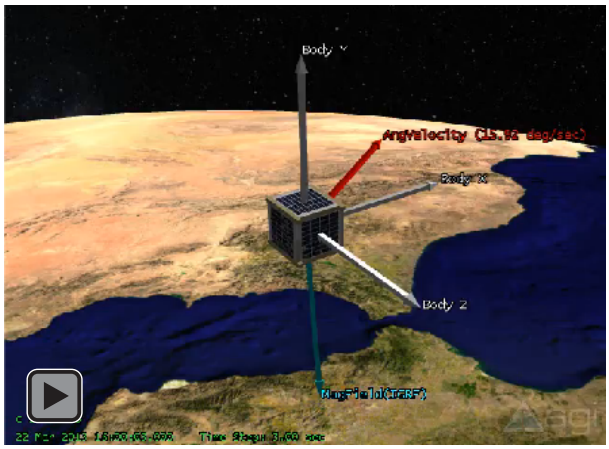


Fig.18: STK orbital embedded video. Click to play.

XI. CONCLUSIONS

This research describes the design and construction of an economical and high-performance attitude control for 1U cubesat base on low cost 3D MEMS IMU sensor and Arduino CPU. Both STK and MATLAB scripts have been used to compare the propagated data and errors have been also modeled. With this work, we want to contribute with improvement of the engineering master's student skills in the field of aerospace physics knowledge.

ACKNOWLEDGMENT

The experiments and the testbed were supported by GranaSAT Aerospace in collaboration with the Telecommunication Master Student office. The authors also gratefully acknowledge the important contribution of lab technicians of the company DHT Technology.

This research received financial support from the national government of Spain, Project DEEPSAT RTC-2016-4644-3.

REFERENCES

[1] J. R. Wertz, (1978). Spacecraft Attitude Determination and Control

[2] W.J Larson, J.R. Wertz (1999). Space Mission Analysis and Design

[3] C. D. Hall, (2003). Spacecraft Attitude Dynamics and Control

[4] http://www.cubesat.org/about/

[5] Restrepo, Andres & Franco, Edinson & Pinedo, Carlos. (2014). Tri-axial Square Helmholtz Coils System to Generate Uniform Magnetic Field Volume

[6] https://www.agi.com/products/engineering-tools

[7] M. Lovera, "Magnetic satellite detumbling: The b-dot algorithm revisited," 2015 American Control Conference (ACC), Chicago, IL, 2015, pp. 1867-1872

[8] Vallado, David & Crawford, Paul. (2008). SGP4 Orbit Determination

[9] https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html

[10] https://celestrak.com/software/vallado-sw.asp

[11] https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/34388-international-geomagnetic-reference-field--igrf--model

[12] https://sites.google.com/site/sailboatinstruments1/proof

[13] Carrara, V. An Open Source Satellite Attitude and Orbit Simulator Toolbox for Matlab. DINAME 2015 – Proceedings of the XVII International Symposion on Dynamic Problems of Mechanics. Natal, RN, Brazil, Feb 22-27, 2015. (ISSN 2316-9567)

[14] https://www.celestrak.com/NORAD/elements/

[15] https://github.com/georgewfraser/drawing/blob/master/geo/IGRF/geomag60.c

[16] https://www.dropbox.com/s/d9kqnpgrt4vvdfu/CAD-Blender-Collada-STK.zip

[17] http://help.agi.com/stk/

[18] http://www.nuts.cubesat.no/upload/2013/03/01/masteroppgave-gaute-brathen.pdf Section 2.6.1

Low cost TVAC Chamber for aerospace tests

Juan Manuel López Torralba
GranaSAT Aerospace Group
University of Granada
Granada, Spain
jmlopezt@correo.ugr.es

Andrés Roldán Aranda
Electronics Department
University of Granada
Granada, Spain
amroldan@ugr.es

***Abstract*— All the spacecraft subsystems must be exhaustively tested before launch in order to obtain space-worthy solutions. The aim of this paper is to perform several qualification tests for increasing the Technology Readiness Level (TRL) of a Commercial Off-The-Shelf (COTS) solar cell protection diode. For accomplishing the tests, we undertake the design and manufacturing of a Thermal Vacuum (TVAC) Chamber able to reach extremely low temperatures and to deal with High Vacuum (HV) conditions. This testing facility system will be able to recreate space conditions and to perform aerospace tests.**

Keywords*— *TVAC Chamber; High Vacuum; Low cost; Space-worthy components, Technology Readiness Level, Solar cell protection diodes.

I. INTRODUCTION

Before flying a satellite, thoroughly environmental tests must be performed to guarantee mission success and survivability of the whole system. These tests are carried out in dedicated equipment denominated as Thermal Vacuum (TVAC) Chambers. A TVAC is used to reproduce as closely as possible the space conditions which a satellite will be exposed to. The closest equipment which can be found in most electronic laboratories is the environmental chamber. However, the common climatic test chambers are not able to perform test in vacuum and below 20ºC.

The TRL of a spacecraft component is classified on a scale from 1 to 9 and defines its technical maturity. In this research our target is to increase the TRL level of a COTS diode not to flight-proven level (TRL9) but to functional verification level (TRL4).

The TVAC design is proposed as a low-cost alternative to commercial solutions found in the market. In order to simulate the system, it was needed in-depth knowledge of computer-aided design (CAD), computer-aided manufacturing (CAM) and thermal analysis. The use of this TVAC chamber in the Aerospace Electronic course of the Telecommunication Master for testing a COTS solar cell protection diode has introduced students in vacuum technology and improved their skills in aerospace measuring procedures.

II. THERMAL VACUUM CHAMBER

A. Structure

The main purpose of this research consists in the design of an economical TVAC chamber. There are a wide range of structural shapes for TVAC chambers ranging from simple boxes and cylinders to spheres and geodesic balls [1]. The shape which presents the best structural rigidity and minimize material is a sphere [2]. However, a box shaped TVAC chamber has been designed considering the manufacturability, internal dimensions and the final expenses.

The TVAC chamber has been designed with 260.4 kg in weight and 372.7 l in capacity, able to reach HV conditions and extremely low temperatures. AISI 304 stainless steel was the material preferred for the parts that are exposed to vacuum such as the chamber walls, internal shroud, doors and ports considering its outgassing rates and its high strength [4]. AISI 304 Stainless Steel (SS) 10 mm thickness has been used for the manufacturing of the chamber walls [3].

The chamber has two configuration possibilities for the vacuum chamber door. The first one consists of a 40 mm in thickness methacrylate door which allows observing the aerospace test without pressure leakages. Additionally, there is a 10 mm thickness AISI 304 stainless steel door with a 90 mm diameter viewport in its center. To attach the viewport into the door a 10 mm in thickness washer shape supplement has been added in order to gain thickness in the mounting. The claw clamp bolts go into tapped holes on the supplement. To avoid leakages in the viewport, a total of eight single claw clamp has been added. The use of less clamps results in a likelihood of leakage.

In Fig. 1 and isometric views of the designed TVAC Chamber with methacrylate and 304 stainless steel vacuum gate configuration are shown, respectively.

The internal structure of the chamber contains a shroud which outer part is covered with MLI film to reduce cooling time[4]. Between the MLI film and the outer faces of the shroud a piping system has been added. The shroud consist of an AISI 304 stainless steel 2 mm in thickness squared structured with dimensions of 650x650x525 mm and a rail guide. The rail guide is used for accessibility purposes. Additionally, several crossbars have been added in the outer faces of the chamber to increase the structural rigidity [2] and to benefit from improved maneuverability of the TVAC chamber. The support base is responsible for preventing vibrations from the vacuum and thermal systems [1].

The TVAC chamber includes multiple feedthrough ports for instrumentation purposes and for the normal chamber operation avoiding any pressure leakage or thermal change on the running tests. All the ports are sealed with NW Wing Nut

Clamps and O-rings to reduce thse probability of failure. There are a total of seventeen feedthrough ports including three NW-16 Type-K Thermocouple and three NW-25 8 pin Electrical Instrumentation Feedthroughs. These feedthrough are able to transmit 1 kV signal voltages and currents up to 7 A. In addition, a total of two KF-16 and seven KF-25 welding sockets have been added to meet future needs. Finally, two dual liquid nitrogen (LN_2) KF-50 feedthroughs have been included for the injection and extraction of LN_2 to the Chamber. The ports which are not in operation are ended with blank flanges.

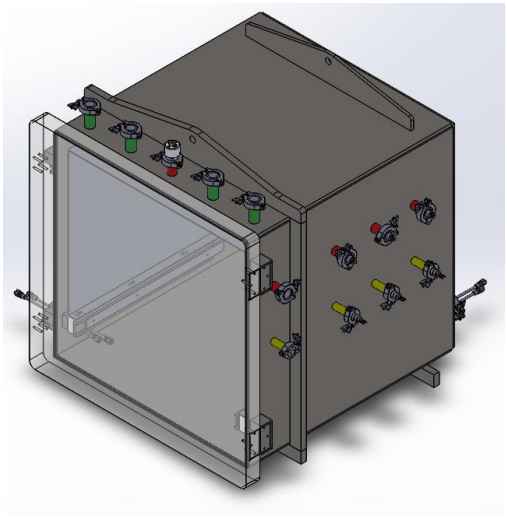


Fig. 1. TVAC Chamber with the methacrylathe door.

In the Table 1 a list of features of the designed TVAC chambers are shown.

TABLE 1. LIST OF FEATURES OF THE TVAC CHAMBER

Shape	Box
Inner Dimensions	700x745x700 mm
External Dimensions	1065x1024x857 mm
Internal Volume	372.75 l
Shroud Dimmensions	650x650x525 mm
Structural Material	AISI 304 SS
Flanges Material	Stainless Steel
Flange Type	ISO KF-16/25/50/63
Gate Configuration	Methacrylate & 304 SS
Viewport Type	Kodial Optic
Viewport Diameter	90 mm
Weight	260.39 kg

B. Vaccum System

The objective of the vacuum system is to decrease the pressure within the chamber to a desired level in a brief period of time on a clean atmosphere. The designed TVAC Chamber is able to deal up to 10^{-5} Torr. This vacuum condition must be maintained during the whole test. The pressured within the chamber will be measured with a 925 MicroPirani Vacuum Transducer controlled via RS-232.

The vacuum system consist of two interconnected pumping units [1][3][4]. First, a Telstar rotary vane pump is used to reduce the pressure inside the TVAC chamber from ambient to 10^{-3} Torr [4]. For releasing the pressure from 10^{-3} Torr down to 10^{-5} Torr a Turbo-molecular pump is used [3]. The Turbo-molecular pump is only needed in cases in which the HV conditions are a requirement for the test. It is connected to the Chamber using a dedicated ISO-63 feedthrough port located on the backside. The cooling of the Turbo-molecular pump is carried out by the Isotemp 6200 R35 Recirculating Chiller.

The rotary vane pump is an oil-sealed positive rotary displacement pump. The pumping system consists of vanes mounted to an eccentrically installed rotor inside of a circular housing. The Turbo-molecular pump consists of rotor and stator blades. The transfer of movement stimulus from the swiftly rotating blades to the gas molecules being pumped is the base of the pumping effect.

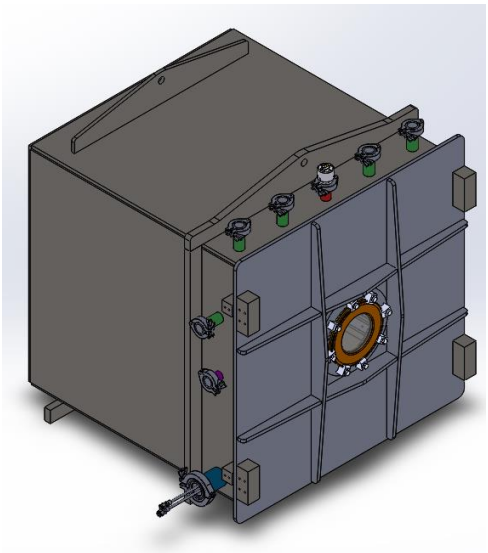


Fig. 2. TVAC Chamber with the 304 stainless steel door

The use of two pumping units is the consequence of the performance limitations of the pumping units available in the market.

The block diagram of the Vacuum System is shown inFig. 3. Vacuum System block diagram.Fig. 3.

C. Thermal System

The objective of the thermal system is to recreate the extremely low temperatures in space. The system must have total control of the temperatures inside the chamber during the thermal tests. The temperatures of different elements of a satellite are collected using three NW-16 Type K thermocouples. We expect to obtain precious data for further understanding of the thermal responses of a satellite expose to the space environment.

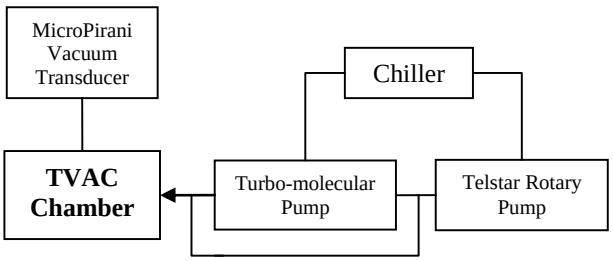


Fig. 3. Vacuum System block diagram.

The TVAC chamber implements a thermal control mode which consists of Cooling and Heating stages [4]. For the first one it can be used LN_2 injection or the Isotemp 6200 R35 Recirculating Chiller, reducing the inner temperature of the chamber down to -180ºC and -35ºC, respectively. The LN_2 is injected into the chamber using the Dual liquid Nitrogen Feedthrough located on the back of the TVAC chamber. The LN_2 is then discharged as gas through another Dual liquid Nitrogen Feedthrough located on the lateral of the chamber. These feedthroughs are built with dual coaxial tubes which efficiently reduces condensation on its external side ensuring the integrity of the seal. As for the heating stage, the same Recirculating Chiller can used to swiftly heat the shroud up to 200ºC. In both stages a copper piping system covered by MLI film is used for the circulation of the fluid [4]. The block diagram of the Thermal System is shown in Fig. 4.

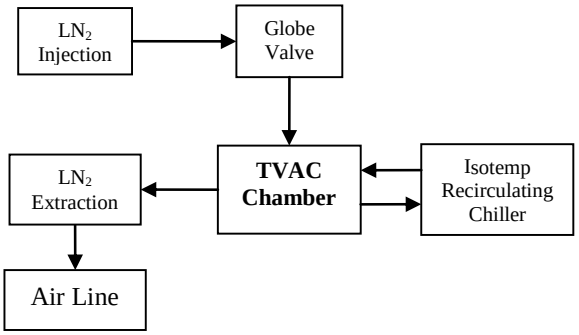


Fig. 4. Thermal System block diagram

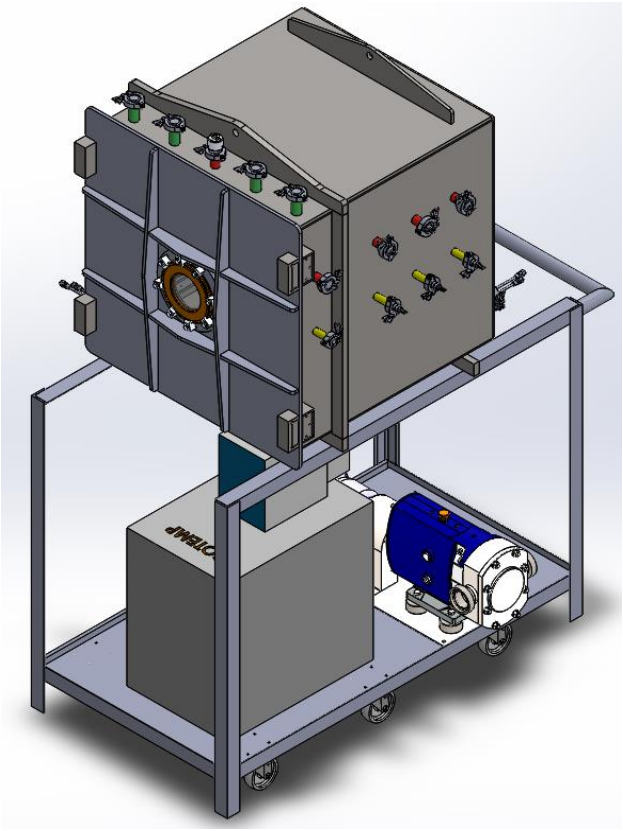


Fig. 5. Thermal Vacuum Chamber front view.

All the temperature parameters involved in the thermal tests are controlled externally using a computer with Matrix Laboratory (MATLAB) GUI measurement application designed by the students.

D. Instrumentation Data Acquisition and Control System

The Control System implements the interfaces and tools for controlling and supervising all the electronic and mechanical devices and systems which constitute the designed TVAC chamber [1]. The Instrumentation Data Acquisition is a critical stage for successfully perform aerospace tests. The more data collected the better for the comprehension of the satellite behavior in the space environment. Controlling each stage of the vacuum and thermal cycles is possible with a computer and MATLAB. The designed TVAC Chamber has a total of seventeen feedthrough ports for instrumentation purposes. This data provides the engineers an adequate amount of information for supervising the processes or even intervene in the ongoing operation if needed. If desired, further analysis of the under test satellite can be done in order to minimize risk in its development. The 12 multiplexed channel Siglent SDM3065X 6 ½ Digits Dual-Display Digital Multimeter is used through USB to measure temperatures in different internal points, currents and voltages selected by the user.

As said before, three feedthrough ports with eight pins are used for sink or drain current or voltage signals up to 1 kV and 7 A. For the thermal analysis another three Type K Thermocouple feedthrough ports are used. The unused ports are able for expansion purposes. In Table 2 a list of the functionalities of the feedthrough ports can be found.

TABLE 2. LIST OF INSTRUMENTATION FEEDTRHOUGH PORTS

Feedthrough port	Quantity	Functionality
KF50 Dual Liquid Nitrogen	2	1x LN_2 Injection
		1x LN_2 Extraction
KF25 Half Nipple	5	1x MicroPirani Vacuum Transducer
		3x Electrical Intrumentation
		1x Future Needs
KF25 Long Nipple	1	Recirculating Chiller
KF16 Metric Long Nipple	5	3x Type K Thermocouples
		1x Telstar Rotary pump
		1x Recirculating Chiller
KF25 Metric Long Nipple	5	Future Needs
ISO63 Nipple	1	Turbo-molecular Pump

III. SOLAR CELL PROTECTION DIODES TESTS

A. Burn In (BI)

The BI qualification test purpose is to significantly reduce operational failure rate by screening out infant mortality failures within the qualification batch [5].

The process consists of two phases consisting of 200 h reverse biases with V_{REV} = -1.5 V_{OC} and 16 h forward biased with I_{FW} = 1.1 I_{SC}, respectively, under ambient pressure conditions. In both phases the diode must be under load with a temperature of T_J = TBS ºC [5].

B. Temperature Behaviour (TB)

The TB qualification test purpose is to determine the electrical parameters of the solar cell protection diodes as a function of the temperature in order to design the solar generator [5].

The process consists of performing the Diode Characterization (DC) test at three temperatures as a minimum. Those temperatures are T_J = 25 ºC, 80 ºC and 150ºC for common test. For mission specific qualification, those temperatures changes according to the diodes highest, operational and lowest predicted temperature [5].

C. Diode Characterization (DC)

The DC qualification test purpose is to analyze the performance degradation of the diode after an environmental test [5].

The procedure is based on obtaining the forward and reverse I/V characteristic of the protection diode. For performing the test, the forward current must be 1.1 times the expected current at the maximum mission temperature. For the reverse stage, the reverse voltage must be n times the expected solar cell V_{OC} voltage at the minimum mission temperature, where n ranges from 1.33 to 1.5.

The qualification test must be recorded at different temperatures, including the maximum and minimum performing temperatures for different times [5]. In the Fig. 6 a block diagram of the DC test is shown.

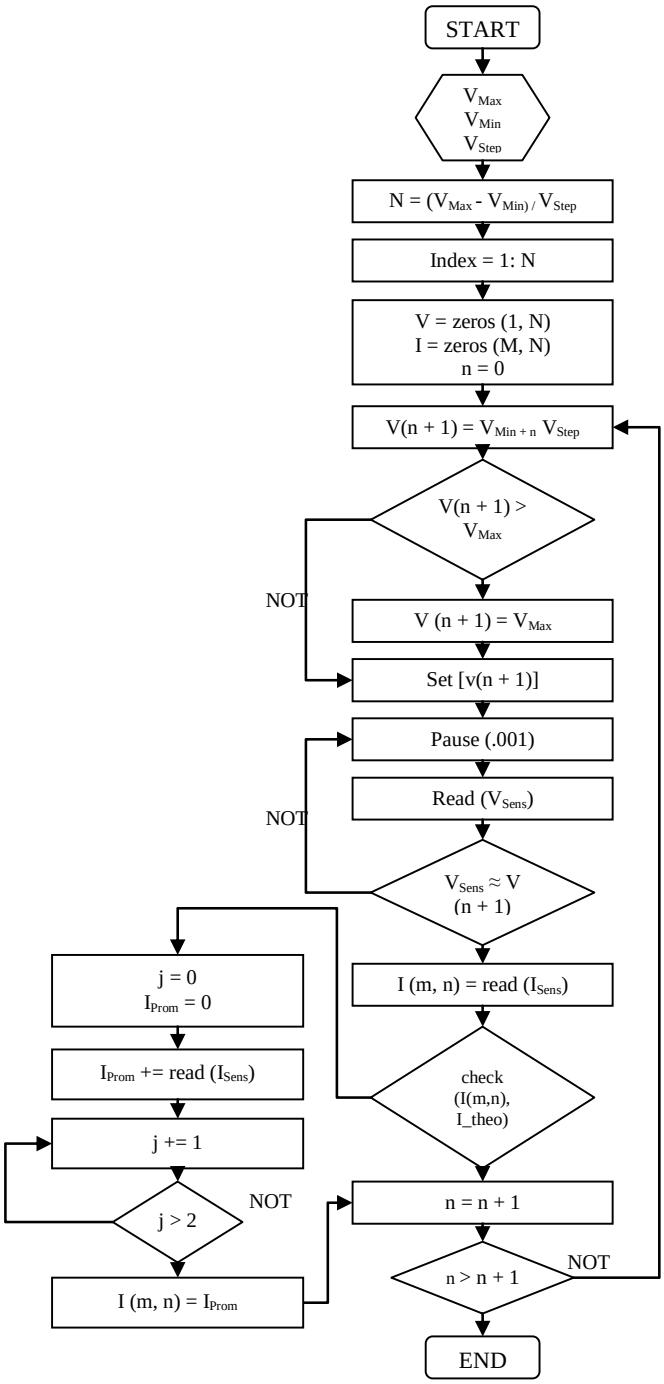


Fig. 6. Diode Characterization Qualification Test

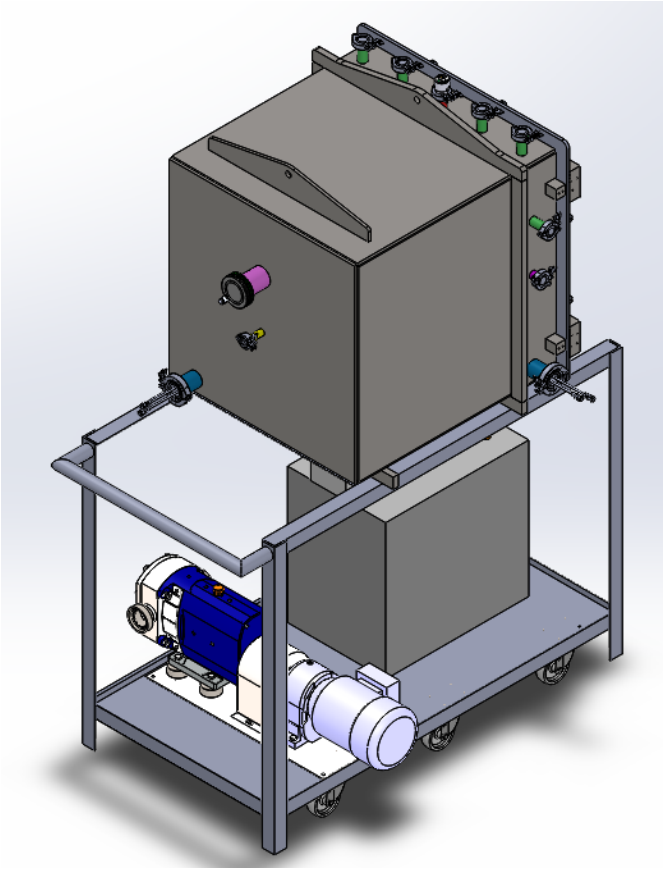


Fig. 7. Thermal Vacuum Chamber rear view.

Stainless steel has been used for the manufacturing of the Chamber, the internal shroud and the feedthrough ports. The designed system has a total capacity of 372.75 l, figure 7. The capacity of the inner chamber is 221.81 l. A Vacuum System has been designed with the capability of reaching Medium and High Vacuum. High Vacuum is attained in two steps configuration using Turbo-molecular and rotary pump in series. If working in Medium Vacuum (MV) conditions the rotary pump is used directly. The designed Thermal Vacuum allows reducing the internal temperature to -160º C using LN_2. A shroud covered by MLI film is used in order to decrease the time of cooling.

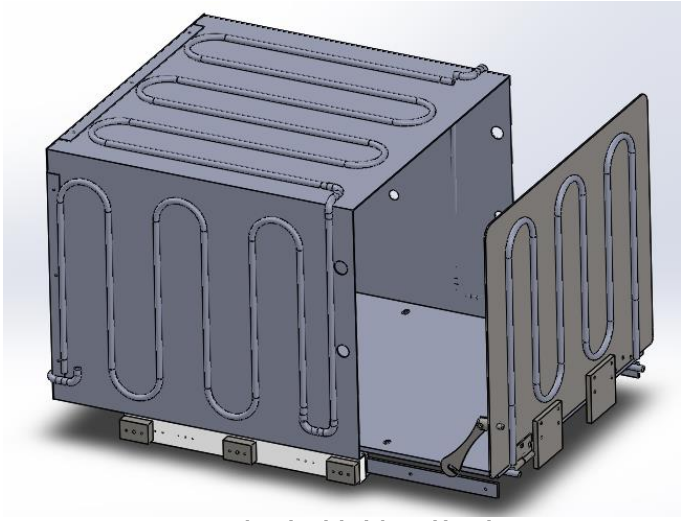


Fig. 7. Shroud and dual thermal liquid circuit.

Priceless instrumentation data will be obtained through the aerospace test performed onto the TVAC Chamber. This information will be greatly appreciated for the engineering teams involved in the developed and testing of satellites under analysis. We also expect to reduce expenses in development stages. The use of the manufactured TVAC Chamber for aerospace testing will be crucial for avoiding critical mistakes.

Finally, a preliminary 24 hours-length vacuum test has been performed in the TVAC Chamber reaching MV (1-0.01 mbar) conditions. The rotary pump has been used directly for this test. Our MATLAB control panel has been used for the signals acquisition. In Fig. 8 the results of the test can be observed.

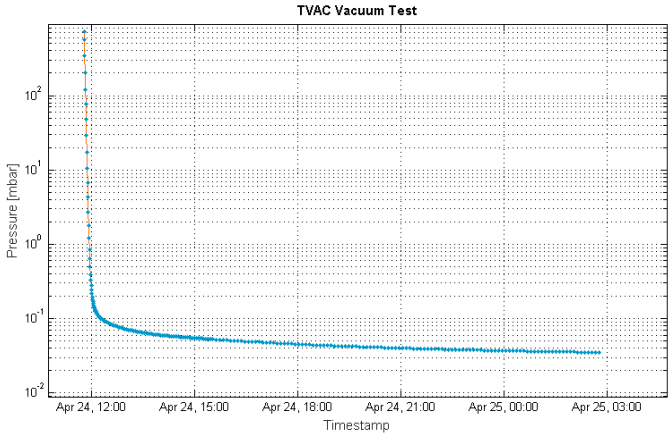


Fig. 8. TVAC MV Test not including Turbo-molecular pump.

In the above figure we can observe the TVAC reaching MV conditions after 1 hour.

IV. CONCLUSIONS

This research describes the design and construction of an economical and high performance Thermal Vacuum Chamber able to operate aerospace test. The idea of designing a TVAC Chamber arise as a reaction to the existing TVAC chambers on the market, where prices are not affordable for modest research groups. However, for some years now, the design of modest vacuum chambers has been breaking barriers in terms of price and performance [1][3][4]. Our research is based on these investigations and aims to contribute in the design of economical and high performance vacuum chambers. Besides, the use of the designed TVAC Chamber in other research fields such as biomedicine or biology is promising.

The total cost of the design and manufacturing has been less than 3000 € which is an affordable cost compared with the available market solutions. We hope this research will act as source of inspiration for researchers who wish to manufacturing similar equipment to their laboratories.

The Graphical User Interface application based on MATLAB has been developed by students in order to perform all the measurements of physical magnitudes (temperature, current, voltage, etc.). The usage of the TVAC chamber in the lab. activities is a valuated task by the students.

ACKNOWLEDGMENT

The experiments and the TVAC Chamber fabrication were supported by GranaSAT Aerospace in collaboration with the Telecommunication Master Student office. The authors also gratefully acknowledge the important contribution of lab technicians of the company Mecanizados Granada S.L.

This research received financial support from the national government of Spain, Project DEEPSAT RTC-2016-4644-3.

REFERENCES

[1] R. Stevenson et al., “Development of a Thermal-Vacuum Chamber for testing in Small Satellites,” pp. 2017–228.

[2] K. Harrison, “Engineering a Better Vacuum Chamber,” pp. 1–4.

[3] S. Jayaram and E. Gonzalez, “Design and construction of a low-cost economical thermal vacuum chamber for spacecraft environmental testing,” J. Eng. Des. Technol., vol. 9, no. 1, pp. 47–62, Mar. 2011.

[4] J. Jeon et al., “Construction of a thermal vacuum chamber for environment test of triple CubeSat mission TRIO-CINEMA,” J. Astron. Sp. Sci., vol. 30, no. 4, pp. 335–344, 2013.

[5] “Space engineering Photovoltaic assemblies and components ECSS Secretariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division Noordwijk, The Netherlands,” 2012.

Low-cost Laser Cutter and PCB exposure

José Carlos Martínez Durillo, Pilar Moreu Falcón
GranaSAT Aerospace Group
University of Granada
Granada, Spain
jcmartinezdurillo@correo.ugr.es, pilarmoreu@correo.ugr.es

Andrés Roldán Aranda
Electronics Department
University of Granada
Granada, Spain
amroldan@ugr.es

***Abstract*— Downward trend in laser technology price and increase of the accuracy achieved has allowed it to acquire a new dimension in recent times. This paper proposes, with a practical approach, focusing on the RF field, the use of an innovative low-cost laser technology as part of the practical syllabus of an Advanced Electronics Prototyping Techniques course or similar. It provides with conceptual understanding on industrial manufacturing limitations while studying different materials engraving, professional software suites and PCB Exposure, in contrast with the expensive CNC milling methods typically used, an alternative cheaper laser engraving technique for RF is exposed.".**

Keywords*— *cutter; electronics education; engraving; Gerber; laser; low-power laser; Radio-Frequency PCB; stencil; SVG format.

I. INTRODUCTION

Currently, laser cutting is increasingly being used thanks to the advantages that it offers. One of the most important factors is the reduced price of the low-power laser cutting machine, which allows any user or company to easily acquire it. The reduction of the production costs and the increase of the quality of results are also a significant factor. That is why small businesses and universities are including this technology in the manufacturing process of their devices and R&D laboratories.

In a laser cutting machine the material melts or burns depending on the power of the incident laser, obtaining a very good quality surface finish. Particularly, this paper will deal with low-power laser technology. It uses less energy than other relevant cutting methods, such as plasma cutting, which needs powers around 3 kW to get similar results. Also, it is a technology that allows cutting easily without the help of advanced tools since the laser cutting machine is easy to acquire and control. This control is easy because the low-power laser cutting machine is a CNC (Computer Numerical Control) machine, i.e., the computer controls the position and speed of the motor that drives the axes of the machine [1].

Another advantage of a low-power laser cutting machine is that the laser beam does not wear during the cutting process, as well as their safety, since it does not include sharp elements, typical of mechanical machines. This prevents users from suffering accidents or the need of pieces replacement [2]. Additionally, low-power laser cutting technology allows cutting small objects or small diameter pieces in detail with high quality having a very low level of contamination on the work piece compared to traditional mechanical cutting techniques [3]. For these reason, the accuracy and quality of the results are better than the ones obtained by traditional methods of cutting.

However, like any other technology, it has some disadvantages. Low-power laser cutting technology cannot cut all kinds of materials. For example, copper, high thicknesses materials, metals and most transparent materials (such as glass) are impossible or too difficult to cut with a low-power laser beam because they reflect too much light or they are too thick. The following table describes the materials in which it is possible to engrave or cut.

TABLE I. ENGRAVING AND CUTTING MATERIALS FOR LOW-POWER LASER CUTTING MACHINE

Material	Can it be engraved?	Can it be cut?
Wood and bamboo	Yes, in any thickness	Only small thicknesses
Plastic and paper	Yes, in any thickness	Yes, in any thickness
Leather	Yes, in any thickness	Only thin leather
Bank card	Yes, in any thickness	Only thin bankcard
Rubber	Yes, in any thickness	Only thin rubber
Foam and felt	Yes, in any thickness	Yes, in any thickness
Horn	Yes, in any thickness	No
Metal and copper	No	No
Stone and shell	No	No
Transparent and translucent material	No	No
Reflective material	No	No
Ceramic	No	No
Jewelry	No	No
Silver	No	No

When the target are high thicknesses materials, laser power must be higher, so the energy required to keep the device in operation is very high. Certain materials, especially plastics, produce quite toxic fumes in cutting process, so the cutting machine should be placed in well ventilated places. The speed depends on the type of laser and the type (and thickness) of the material to be cut. Nowadays this technology is being fast developed to solve these drawbacks as it is expected to play an important role within cutting techniques.

A. *Description of the used laser cutter*

A low-power EleksMaker Laser-A3 Pro 2.5 W laser cutter is purchased, with a price of 209.00 €. It is made of stainless steel and acrylic and has a size of 60 x 45 x 25 cm. The low-power laser cutting machine allows engraving and cutting the materials mentioned above (Table I) with A3 format as maximum size (30 x 40 cm).

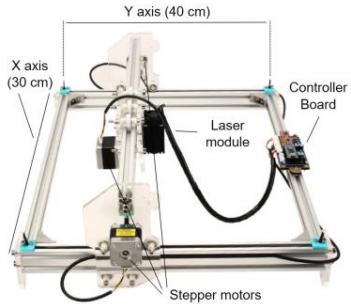


Fig. 1. Laser Cutter EleksMaker Laser-A3 Pro 2.5 W. It is formed by: a laser module, a controller board, three stepper motors, four stainless steel blocks that form the working area of the machine and another stainless-steel block to hold the laser module and allow its movement in two dimensions [4].

It has a laser diode of 2.5 W of power and it works with a wavelength of 445 nm. The laser light is violet and, also features a low positioning light. The controller board is EleksMaker Mana SE and it allows the control of the X and Y axes at the same time in a single movement. It communicates with the computer through the mini USB port. The controller board has three connection ports, one for each stepper motor. Also, it has two more connection ports, one to connect an optional 12 V power supply and another to connect the laser module.

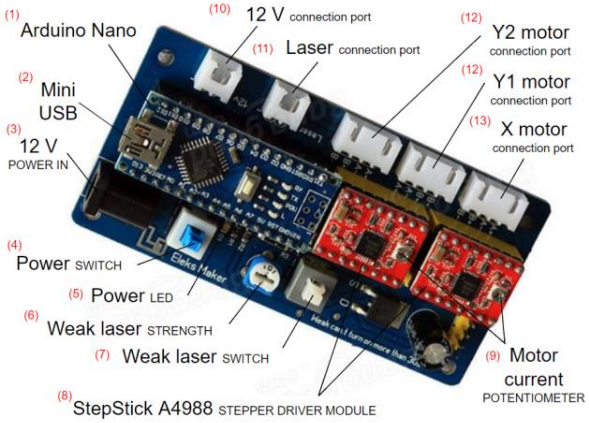


Fig. 2. Controller board. (1) Arduino Nano. (2) Mini USB of Arduino Nano board. (3) 12 V power input. (4) Power switch. (5) Power LED. (6) Weak laser strength. (7) Weak laser switch. (8) StepStick A4988 Stepper Driver Module. (9) Motor current potentiometer. (10) 12 V connection port. (11) Laser connection port. (12) Y motor connection ports. (13) X motor connection port [4].

The controller board has an Arduino Nano board and two carrier board for Allegro's A4988ET DMOS Microstepping Driver with Translator and Overcurrent Protection [5]. Also, a heat sink needs to be attached to the A4988ET. This driver allows controlling one bipolar stepper motor at up to 2 A output current per coil. However, the manufacturer EleksMaker indicates that the stepper motors employed are 1.3 A [4][6].

The machine has three stepper motors for X and Y axes, so it can engrave and cut in 2D. It uses two motors to control X axis movement and the third stepper motor for the Y axis.

B. *Description of control software*

Low-power laser cutting machine supports different applications: EleksCam, Candle, Benbox, Grbl controller, LiteFire or LaserWeb. LaserWeb is the most used because it is a free software that allows controlling printers, engravers and laser cutters. It supports different firmwares: Grbl, Marlin, Smoothieware and LasaurGrbl. Currently, version 4 is the latest, available at the GitHub project repository [7]. It is based on Node.js [8] and it is supported by most platforms: Windows, Linux, Mac, Raspberry Pi and Vagrant. To use this software in the laser cutter, the hardware of the machine must be slightly modified. Specifically, S header must be shorted with V0.9.

This machine works correctly for a maximum continuous working time of 2 hours [6]. Then it is necessary to wait 30 minutes, a time in which the laser module cools down. The equipment requires a working voltage of 12 V and a current of 2.5 A [1]. The desktop low-power laser cutter is delivered disassembled. The distributor provides a video tutorial ("*How to Assemble for A3 30x40 cm DIY Violet Laser Engraving Machine*"). This activity may be also useful from the teaching point of view, to be proposed for students as a medium complexity assembly of a real product.

II. LOW- POWER LASER CUTTER BASIC APPLICATION

The most basic application of the laser machine is to cut the materials mentioned above (Table I). To engrave or cut the objects with greater or less intensity, the parameters are modified at the control software. The most important parameters are: the percentage of used power, the number of passes over the same line and the engraving speed. In this application, the low-power laser cutter plays a very important role among all the technologies used. It allows cutting very detailed pieces of an easy and precise form with a very low production cost when compared other techniques [9]. The result varies depending on how the object is designed; in our case, as a first approximation, it will be used AutoCAD® [10]. For this reason, we will evaluate the results obtained for different design formats of the object in this software, as well as describing the procedure needed.

A. *Cutting and engraving process*

In this section, we describe the cutting and engraving process with the low-power laser cutter. The following software are needed to cut objects with this machine: AutoCAD® [10], Inkscape [11] and LaserWeb [7]. AutoCAD® [10] is a paid tool from Autodesk. However, there is an educational version, which would allow its use for the practical syllabus period. Inkscape [11] is an open source vector graphics editing software. LaserWeb [7] is the CNC control software described before. Fig. 3 shows the flow chart of the processes that must be followed to carry out the cutting of an object with the low-power laser cutting machine.

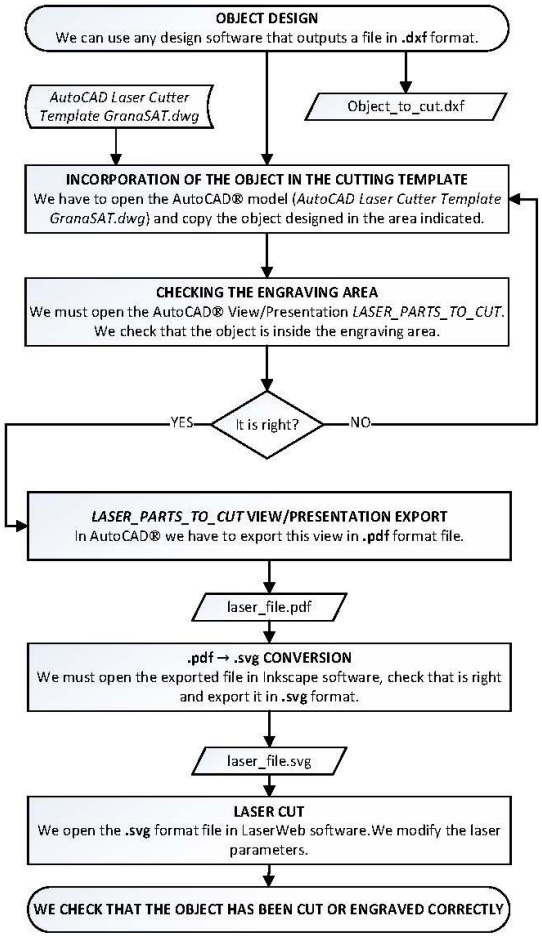


Fig. 3. Flow chart of the processes that must be followed to carry out the cutting of an object with the low-power laser cutting machine.

Firstly, the cutting template must be designed in AutoCAD® software [10]. It defines the engraving area of 300 mm x 400 mm and shows, the different working modes to make the design efficient. Three layers have been defined: the layer to be cut (red color), the layer to rasterize (white color) and the layer to not cut or rasterize (blue color).

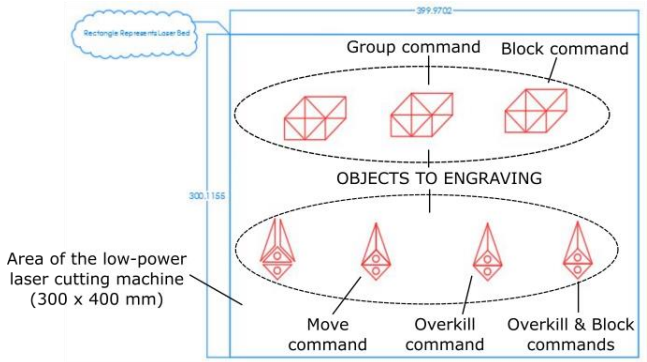
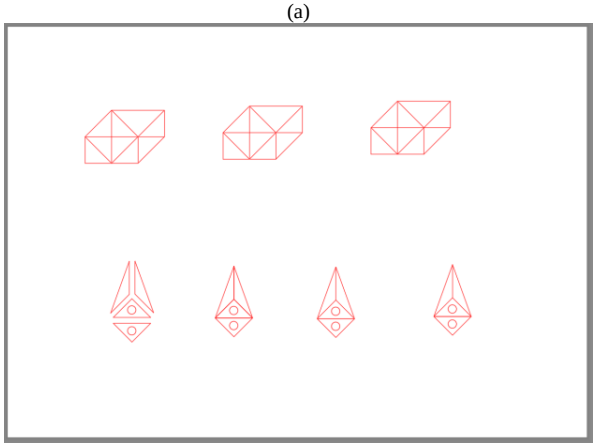


Fig. 4. Template designed in AutoCAD®. It shows the area of the low-power laser cutter (300 x 400 mm) and two types of objects designed with different AutoCAD® commands.

The AutoCAD® [10] project consists of a model and two views: LASER_PARTS_TO_CUT and LASER_EXAMPLE. The model includes both the low-power laser cutting machine area and an example of use. Two views have been made on this, one in the engraving area and another in the example. LASER_PARTS_TO_CUT view shows the objects to be engraved. In this way, we can check if the objects are within the area of the low-power laser cutter. Also, we can see how the lines defined in blue color have disappeared since this layer should not be engrave. On the other hand, in the view LASER_EXAMPLE is shown an example of use in which different AutoCAD® [10] commands have been applied for the same object.

(a)



(b)

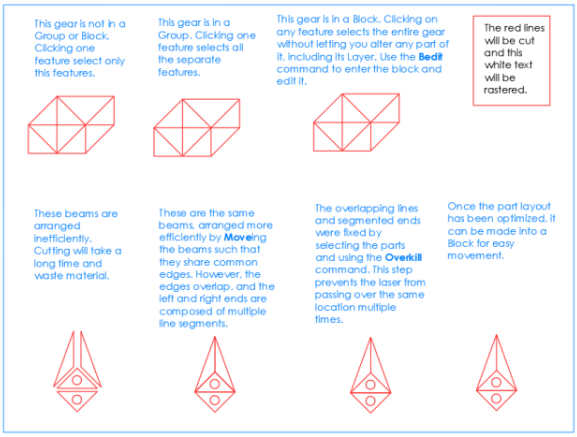


Fig. 5. AutoCAD® project. (a) LASER_PARTS_TO_CUT view. (b) LASER_EXAMPLE view.

B. *Example of use*

In AutoCAD® [10] there are different commands that optimize the design of an object. The example of Fig. 4 demonstrates the advantages of these commands. For this example, we used a sheet of cardboard with a thickness of 2.28 mm. The laser module works at 80 % of its maximum power, 800 rpm [12] and a cutting speed of 1 mm/s. A single pass has been defined to only engrave the object in the material.

If no commands are applied the object is designed line by line. Two commands for grouping the lines that form the object

are compared: GROUP and BLOCK [13]. Using the GROUP command of AutoCAD® [10] and selecting the objects to be grouped [13] improves the efficiency of the object. Now all the items have been grouped and when any of them are selected they will all be selected automatically. Another option is to create a block with all lines. The main difference with the groups is that once created, each time a block is inserted what is done is a reference to the block created so that the AutoCAD® [10] file reduces its size and if it is a block is modified all inserted in the model (Table II). To do this, we use the AutoCAD® [10] BLOCK command [13].

TABLE II. THEORETICAL COMPARISON OF THE DIFFERENT COMMANDS FOR GROUPING OBJECTS

Command	Object View	Theoretical Laser Working Time
No command	Set of lines	Low
GROUP	Set of lines	Medium
BLOCK	A single line	High

When we do not apply any command, the laser engraves each line separately and the working time is reduced but the laser does not work continuously. In the second case, the GROUP command [13] is applied, the route is optimized and the laser "ON" time is higher. The BLOCK command [13] defines the set of lines as a single object. While cutting, the laser stays "ON" all the time so the laser module follows a longer path.

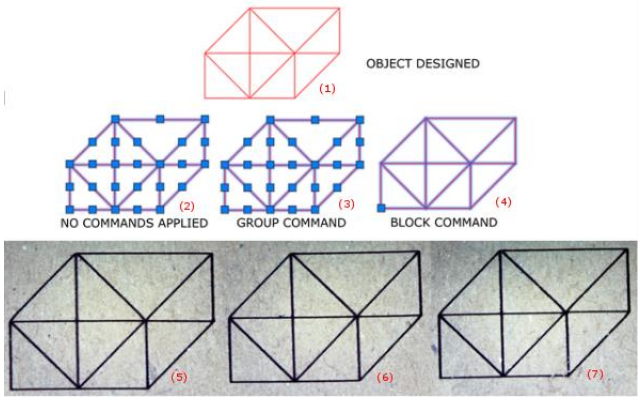


Fig. 6. Comparison of the definition and results of the same object to which different AutoCAD® commands have been applied. (1) Object designed. Definition of the object (2) without applying any commands, (3) by applying the GROUP command and (4) by applying the BLOCK command. (5) (6) (7) Result of the engraving seen from the electron microscope.

Pictures 5, 6 and 7 of Fig. 6 show that the only differences between the different AutoCAD® commands applied are working time of the laser and the path that it follows.

Next, a new object is created to evaluate the effect of having to engrave several objects, depending on whether they overlap or not. For this, two commands are used: MOVE and OVERKILL [14]. First, the geometric shapes are separated from each other by a small distance of 4 mm. This design will not be very efficient since it engraves each geometric shape separately and wastes material. Applying the MOVE command, the shapes are not engraved separately but in cases where the lines are shared in several ways they overlap, with a thicker line in these areas. To solve that problem it is used the OVERKILL command [14]. This function eliminates the duplicated geometry in the selected objects.

TABLE III. THEORETICAL COMPARISON OF THE DIFFERENT COMMANDS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF THE DESIGN

Command	Maximum line width	Theoretical Laser Working Time
No command	Width set	Very high
MOVE	More than the defined width	High
MOVE & OVERKILL	Width set	Low
MOVE & OVERKILL& BLOCK	Width set	Medium

When any command is applied, the working time of the laser will be higher (Table III) and it is possible that if the forms are too close the material will burn. Applying the MOVE command, the working time of the laser has been reduced (Table III) but there are some overlapping lines by which the laser passes more than once and the material can burn. MOVE and OVERKILL [14] commands offers a shorter working time (Table III) and a higher quality result since all lines have the same thickness. Finally, the object has been converted in block with BLOCK command [13].

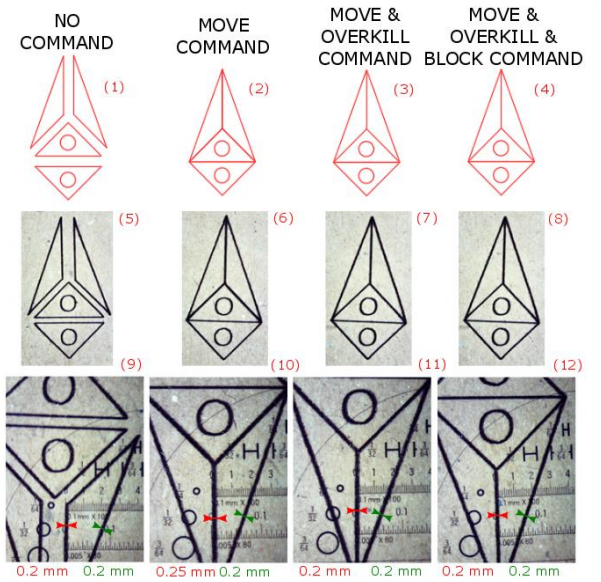


Fig. 7. Comparison of the definition and results of the same object to which different AutoCAD® commands have been applied. Definition of the object (1) without applying any commands, (2) by applying MOVE command, (3) by applying MOVE and OVERKILL commands and (4) by applying MOVE, OVERKILL and BLOCK commands. From (9) to (12) Result of the engraving seen from the electron microscope and measurement of the line width.

For the first case (pictures 1 and 5 of Fig. 7), the forms are separated a certain distance. With the MOVE command (pictures 2 and 6 of Fig. 7) the laser passes more than once through those lines shared by the geometric shapes. The third defined object (picture 3 of Fig. 7) applies the MOVE and

OVERKILL commands [14]. The latter is responsible for all lines have the same thickness: 0.2 mm (pictures 7 and 11 of Fig. 7).

C. *Comparative results*

Below is a comparison of the results for the different design formats (Table IV). It includes the working time of the laser and the thickness of the line engraved by the laser.

TABLE IV. COMPARISON OF THE RESULTS OF THE TWO OBJETCS DESIGNED

Object	Command	Line Width	Laser Working Time (HH:MM:SS)
Object of Fig. 6	No command	0.2 mm	00:01: 44.32
	GROUP		00:01:54.20
	BLOCK		00:01:54.70
Object of Fig. 7	No command	0.2 mm	00:01:41.14
	MOVE	0.25 mm in overlapping lines and 0.2 mm in rest	00:01:39.91
	MOVE & OVERKILL	0.2 mm	00:01:23.34
	MOVE & OVERKILL & BLOCK		00:01:24.03

Creating a group from the objects would be the optimal option because the working time of the laser is minimal. On the other hand, use OVERKILL command [14] reduces the working time of the laser and ensures that all lines have the same thickness and there are no overlapping objects.

III. PCB EXPOSURE

PCB manufacturing is a complex matter. Although manufacturing cost of standard PCB has been dramatically reduced over the last years, it is still expensive and harder to find when RF substrates are required. Different techniques and technologies are used in industry for mass production and prototyping. An innovative low-cost method is exposed in this paper, making use of the laser engraving technique introduced before, which will allow students to study manufacturing techniques in a practical manner, while realizing of the issues which may arise in an industrial process. Again, this process is intentionally followed using professional software suites widely extended in industry, allowing students a first contact with them.

A. *Design Files treatment*

The first issue to deal with is the treatment of the files which contain the PCB layout; Gerber® format is usually used in industry to manufacture PCB. However, the controller software used, LaserWeb, does not admit Gerber files. Therefore, an adequate conversion must be performed. Block diagram of Fig. 8 shows a way to perform the conversion process.

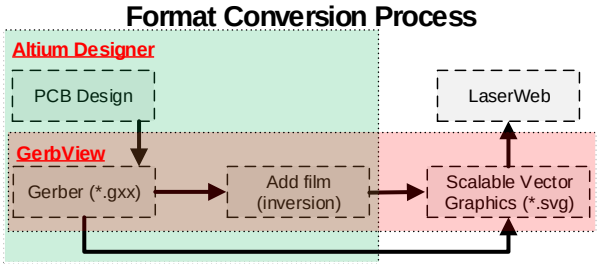


Fig. 8. Film Wizard Menu

This process uses Altium Designer®, one of most extended software for PCB design, and then shows two possibilities: either adding the film directly in Altium Designer®, and convert it to *.svg with GerbView® or make the inversion and convert it to *.svg format all at once using GerbView®. There are, of course, more software and ways to perform this process, however, this will be the one considered in this paper. In case of using Altium Designer®, the first step deserves to be remarked; for the sake of simplicity, instead of a real PCB design, a simple template will be used. In addition, this template will be useful for students to characterize and determine the limitations of the hardware used, which are vital skills when working with rapid prototyping.

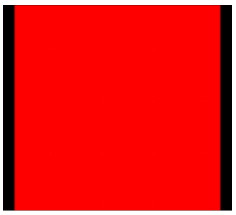


Fig. 9. Gerber Template used

In this case, as it can be appreciated in Fig. 9, it is a simple square; however, the process is the same regardless of the complexity of the design. Once Gerber files (in this case, for the Top Layer) are generated, the steps to follow if using Altium Designer are:

1. Generate *film*. It is the step which inverts the colors of the layout. In Altium Designer® it is created from the menu "Tools→Film Wizard".

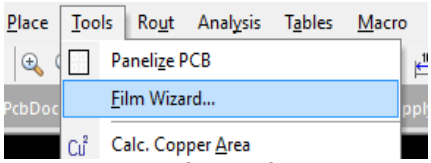


Fig. 10. Film Wizard Menu.

2. It is necessary to set-up the *film*. Fig, 11 shows that the *film* must be configured according to the size of the PCB, (1), the number of them (for panelization), (2), and negative/mirror options, (3). The size must be adjusted according to the case, as well as the panelization; for simplicity, no array will be considered. Finally, negative option must be selected for the layers to be engraved, (4). Regarding film size, if using Altium

Designer®, only entire lengths in inches are accepted. This fact will gain importance later.

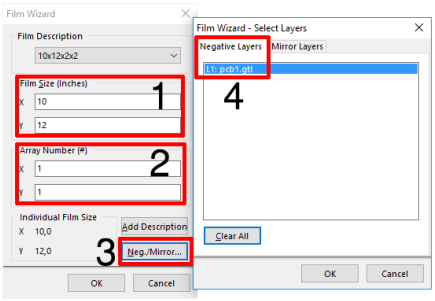


Fig. 11. Film Wizard Menu

When generated, the result looks like Fig. 12.

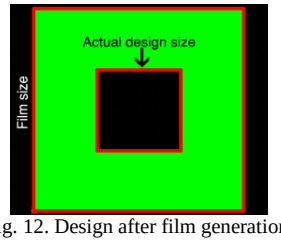


Fig. 12. Design after film generation.

Inversion has produced that the original square has been replaced by an empty space of equivalent size, and has been surrounded with a region whose size corresponds with the specified in **(1)**. It means that the *usable area* of the whole engraving area will be only the black square, while the rest is wasted. Therefore, to minimize wasted material, it is recommended, when using this method to generate the film, to try to make designs whose size is the closest possible to entire units of inches. Of course, as said before, there are other ways to produce the inversion necessary without that constraint; this one is exposed for the extended use of Altium Designer in PCB Design field. Once the film is generated, it can be converted to *.svg format, for instance, using the GerbView software mentioned.

B. *Manufacturing and Testing*

Once the files derived from the design have been adequately treated, a *.svg format file should have been obtained. To perform the manufacturing of the design, that *.svg file must be loaded at LaserWeb.

Fig. 13 shows the main interface of LaserWeb Software. Block 1 is used to load the *.svg files while Block 2 allows setting the options of the process. Particularly, blue boxes have been placed at the three relevant ones; the first one determines the technique used to engrave, in this case, *Laser Fill Path*. The second blue box, *Line Distance*, establish the distance between every round, and it is constraint by the minimum line width that the Laser is able to perform; after testing, for this EleksMaker Laser-A3 that distance was found to be 0.01 mm. The third blue box contains the options regarding *Cut Rate* and



Fig. 13. LaserWeb Main Interface

Passes. Finally, after setting the desired parameters, Block 3 allows generating the corresponding GCODE.

Engraving directly removing the copper from the laminate is a hard task which requires expensive high-power Laser System. In order to be able to engrave the substrate using a low-cost technique, it is painted with Standard Black Synthetic Spray Paint. Once applied, the laminate is let to dry. It allows a low-power laser like this EleksMaker Laser-A3 to degrade the paint layer instead of the copper. It must be remarked the importance of this step: trying to directly remove the copper with a Laser System which is not specifically designed for it may result in severe damage of the Laser because of reflections. Once everything is adequately set, the engraving is started from the menu Control, shown in figure 14.

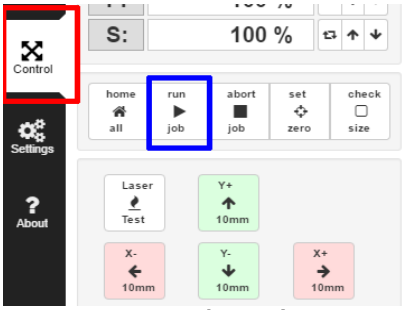


Fig. 14. LaserWeb Control Menu.

After engraving, to remove the paint layer, a chemical attack Technique based on Ferric Chloride is used. Although this is not directly related to the topic of the paper, it is common technique, which in our opinion, students must practice during their academic training; in addition, it reinforces rapid prototyping techniques, extensively requested today. This chemical reaction is composed of Hydrogen Peroxide and it is given by this equation.

$$Cu + 2HCl + H_2O_2 \rightarrow CuCl_2 + 2H_2O \quad (1)$$

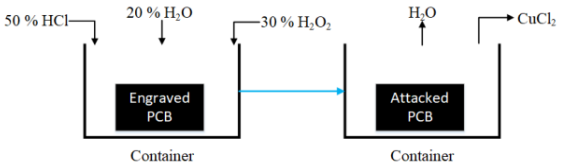


Fig. 15. Chemical Reaction.

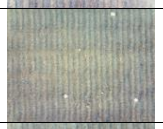
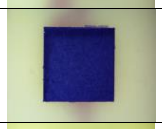
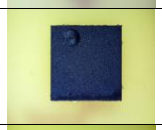
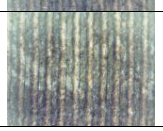
As shown in figure 15, on the left side, the elements which produce the reaction, the copper from the substrate, Ferric Chloride and Hydrogen Peroxide. To control the speediness of the reaction, water is also added to dilute the acid. The proportion used is 50 % HCl, 30 % H_2O_2 and 20 % H_2O. The reaction produces Copper(II) chloride and water. Following this process an experimental comparative is made, with the parameters listed in Table V.

TABLE V. COMPARISON OF THE RESULTS OF THE TWO OBJETCS DESIGNED

Parameter	Value
Laminate Used	FR4. 1.6 mm thickness, 1 oz.
Paint Used	Standard Black Synthetic Paint (Spray)
Artwork dimensions	147.26 x 101.54 mm
Line Distance	0.01 mm
Technique Used	Laser Fill Path
Passes	1
Paint Layers	1
Cut Rate	Variable

Cut Rate defines how fast the laser movement will be. With the parameters stated at table V, the template shown in Fig. 9 is manufactured using different *Cut Rates*, to determine the influence of these parameters in the result.

TABLE VI. COMPARISON OF THE RESULTS

Cut Rate (mm/s)	Before chemical Attack	After Chemical Attack	Engraving Time (HH:MM:SS)
200			2:19:16
500			1:00:29
1000			00:36:56
2000			00:29:40
10000			00:29:12

Regarding results, before chemical attack, lines are more defined when the cut rate is lower, with larger engraving times. After chemical attack, results are quite similar regardless of how fast cut rate is configured, which implies that slow cut rates are not specifically needed to obtain acceptable results. Malformation appreciable at the 2000 mm/s test are probably due to an excessively acid solution.

The faster the cut rate is set, the shorter engraving time. However, this acceleration is not linear at all, although cut rate is increased up to 10000 mm/s, the cutting machine is not able to maintain the engraving time in the same proportion. 2000 mm/s seems to be limit given by this hardware. Fig. 16 shows this relation. The curve obtained can be characterized with an acceptable reliability (R^2 = 0.75) using a non-linear regression given by the equation:

$$y=726.93\ x^{-0.385} \quad (2)$$

With 'y' parameter in minutes and 'x' parameter in mm/s.

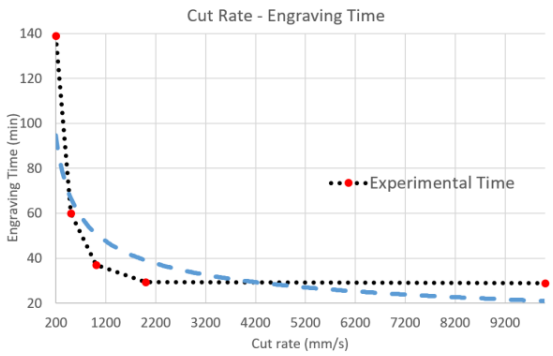


Fig. 16. Cut Rate – Engraving Time curve.

Once the hardware has been adequately characterized and its limitations are known, it is proposed as activity for students to manufacture an actual RF PCB design, particularly a LNA

design, from [18]. It is based on the LNA Mini-Circuits PSA-4 5043 and Top Layer layout is shown in figure X. The design is quite simple because PSA-4 5043 is internally matched to 50 Ω and there is no need to perform any matching network or similar. Figure 17 shows how the result should look like after the processing and before to be manufactured.

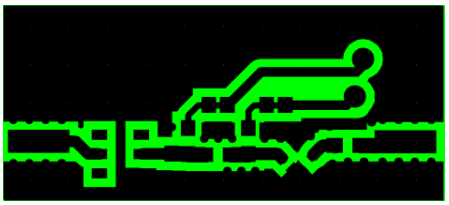


Fig. 17. LNA Layout

C. Stencils manufacturing

Once the circuit is engraved on the PCB board, it is necessary to solder the corresponding components. Currently, the most common method to do this is surface mount technology (SMT). It consists in mounting each component, active and passive, on the surface of the printed circuit. Each of the surface mount devices (SMD) is soldered independently on the board. It is tedious and slow when the number of components is high or you want to make a large amount of PCB. Stencils allow soldering the majority of components at once. Solder paste is deposited on the entire board. That is why the solder paste templates are necessary, so that the solder paste is only deposited in the pads indicated in the design of the circuit.

A board with a row of SMD resistors of different sizes placed one after the other has been designed. This makes it possible to evaluate from what SMD component size laser technology can be used for the manufacture of solder paste templates with Stencils. It is interesting to export the surface layer or Cream Layer or solder paste layer (Fig. 18). Solder paste layer contains the pads where the SMD components will be soldered. The size of the pads is slightly lower than designed because the Stencil layer of the design tool is being exported. This is necessary to compensate for the inevitable melting of the Stencil caused by the laser heat. Other way, the pads will be too large and bridges would be created.

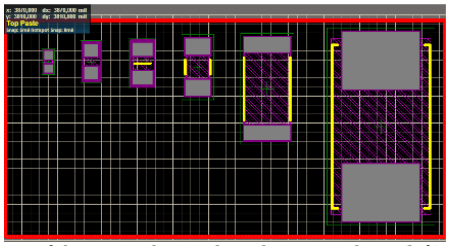


Fig. 18. View of the circuit designed in Altium. Top layer (left) and solder paste layer (right). The colored areas in red (left) and grey (right) are the pads where the SMD components will be welded.

Finally, the file is opened in LaserWeb. The configuration profile of the low power laser cutting machine is loaded and the "*Laser Cut*" cutting mode is set to cut only the contour of each pad. To perform a practical demonstration, a Stencil with a thickness of 0.07 mm has been chosen. LaserWeb allows trying different laser power, cut rate or the number of passes to obtain different results. For the material chosen, the laser starts cutting at 83 % power (830 rpm [12]) and it is recommended to define a speed lower than 100 mm/s for low power and around 1000 mm/s for high power. The higher the power of the laser, the higher the cutting speed must be so that it does not burn the material and vice versa. If cutting speed is too high, the result is less accurate. Increasing the number of passes is useful when the laser power is low, and cutting the material is desired.

This hardware allows manufacturing stencils with a laser power lower than 85 % and cut rate around 300 mm/s. Higher values yield to burnt pads unless cut rate is increased. When manufacturing this this Stencil, a laser power of 83% (830 rpm [12]) has been set, with a cut rate of 1 mm/s and 2 passes.

The Stencil is inspected with the microscope to evaluate if the cut is precise and clean (Fig. 19). The edges of the pads are slightly melted, due to the combustion of the plastic. However, this does not affect the larger pads. With the microscope and the scope of the microscope it is determined which size of pads marks the limit to use laser technology. This pad size is defined as one in which the edges of the plastic form a 90° angle.

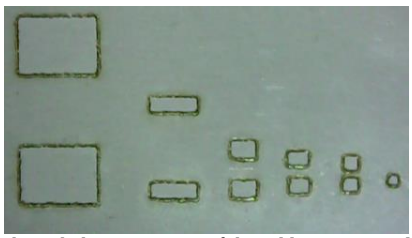
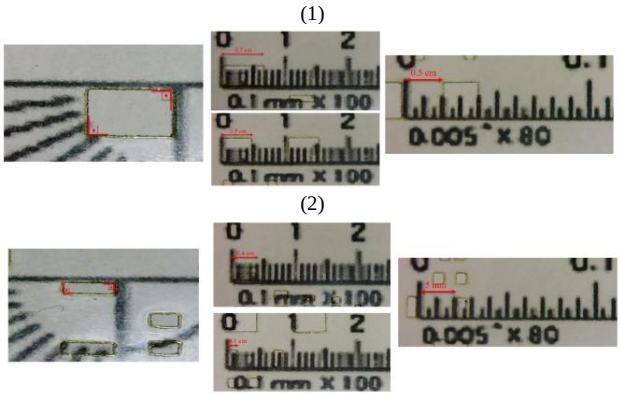


Fig. 19. View through the microscope of the solder paste template of the row of SMD resistors of different sizes. Stencil 0.07 mm thickness.

Fig. 20 shows that pads of the three largest packages the corners form perfect 90º angles and therefore the lines that form it are straight. As the size of the pad is reduced the edges become rounded because the surface is smaller and the plastic melts with the passage of the laser. In this way, laser technology is useful for manufacturing stencils with SMD components with a minimum size of 0.3 x 0.1 cm. It is observed for SMD resistances of 0.2 cm x 0.1 cm that the pad begins to be rounded, curving the lines that form it. The separation between the pads is also important. A large gap will help the pads to be perfect rectangles.



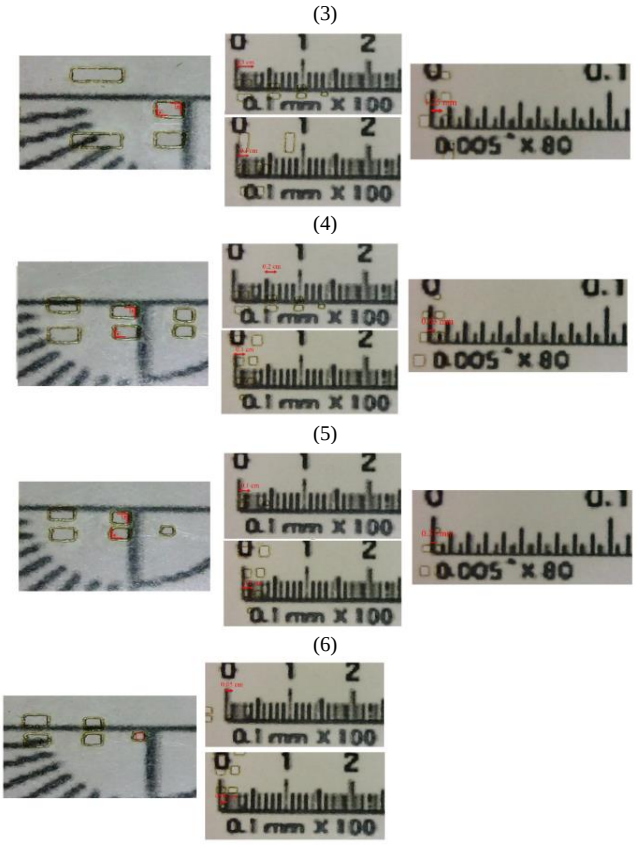


Fig. 20. View through the microscope of the pad of (1) 0.7 x 0.5 cm, (2) 0.4 x 0.1 cm, (3) 0.3 x 0.1 cm, (4) 0.2 x 0.1 cm, (5) 0.1 x 0.1 cm and (6) 0.05 x 0.05 cm. The corner angle of the pad is shown in the image on the left. In red, an angle of 90º has been indicated. The dimensions of the pad (width and height) are shown in the two central images. The separation between the pads is shown in the image on the right.

After that, the Stencil template is placed on the board very well aligned. This stage of the PCB manufacturing process is very important since a minimum error when placing the stencil has great consequences. If the misalignment is noticeable, the board is likely to lose its electrical functions. In addition, ideally the template is stretched and flat on the board. This done, the solder paste is dragged on the entire board. To continue, the stencil template is separated from the plate and the solder paste remains in the circuit pads. Finally, the devices are placed carefully in their correct place. It is crucial that the placement of the SMD components is very accurate. Once all the components are in place, the board is heated to reflow the paste and all the devices are soldered simultaneously.

The board is inspected with the microscope to verify that the components are correctly soldered. It is likely that when placing the solder paste some pins of the devices have a bridge of paste between them. This can occur due to breaks in the template during the placement of the solder paste or because of the short distance between pins and the amount of paste placed. The jumpers and jumpers are solved with solder.

IV. Conclusion

The use of a low-power laser cutting machine to engrave or cut objects is useful because of prize when compared to other machines. It is advantageous since the result of cutting and engraving is very precise. In addition, as indicated in Table I, the low-power laser cutter can cut and engrave materials with different thicknesses in a very low laser working time. Because low-power laser techniques are expected to be increasingly present in manufacturing processes, this article has described in detail the different stages of it (Fig. 3). From an educational perspective, we strongly believe that this topic can offer students their first experience at a variety of fields, from PCB design, to low cost PCB engraving and manufacturing techniques, which makes this content vital in every Master related.

The thickness and opening of the stencil controls the amount of solder paste deposited on the PCB. It is important to have a stencil with the proper thickness and that the opening of the template is optimal so the amount of paste is not excessive as it compromises the electrical functionality of the PCB. For this, it is necessary to have an optimal cutting speed so that the stencil is accurate. On the other hand, the laser slightly melts the edges of the pads, especially the smaller ones. It is proposed as a solution to this problem to cut the template using two superimposed Stencils. In this way, the laser will melt the upper part and when separating the two Stencils, the lower part will be perfectly cut with no edges melted.

References

[1] C. P. G. Santillan y M. Q. Á. Santiago, «Construcción de un prototipo cnc de grabado laser para optimizar el tiempo de producción gráfica en madera y cuero en el laboratorio de robótica de la universidad técnica cotopaxi periodo 2016», Latacunga, Ecuador, 2016.

[2] «Laser MECAFORT,» 1 March 2017. [Online]. Available: http://www.corteporlasermadrid.com/.

[3] «Kjellberg insterwalde,» 2016. [Online]. Available: http://www.kjellberg.de/Tecnologia-de-corte/Plasma/Procedimiento/Otros-procedimientos/Corte-por-laser.html.

[4] «EleksMaker Shop,» [Online]. Available: http://store.eleksmaker.com/index.php?route=common/home.

[5] «Rotobotix A4988,» Flipkart, 2007. [Online]. Available: https://www.flipkart.com/rotobotix-a4988-stepper-motor-driver/p/itme58qsrgjgsytt.

[6] «Banggood Shop,» [Online]. Available: https://www.banggood.com/2500mW-A3-30x40cm-Desktop-DIY-Violet-Laser-Engraver-Picture-CNC-Printer-Assembling-Kits-p-1003863.html.

[7] «GitHub repository Wiki for installation of LaserWeb software,» 21 July 2016. [Online]. Available: https://github.com/LaserWeb.

[8] «Node.js platform,» [Online]. Available: https://nodejs.org/es/.

[9] «Maderame,» [Online]. Available: https://maderame.com/corte-laser-madera/.

[10] «Free software for students, teachers and schools,» AutoCAD®, Autodesk, [Online]. Available: https://www.autodesk.es/education.

[11] «Inkscape Draw Freely,» [Online]. Available: https://inkscape.org/es/descargas/windows/.

[12] «Revolutions Per Minute,» Wikipedia®, 25 May 2017. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Revolutions_per_minute.

[13] C. G. L., «Differences between GROUP and BLOCK,» MVblog.cl, 12 November 2011. [Online]. Available: http://www.mvblog.cl/2011/11/12/autocad-tutorial-08-grupos-y-bloques-en-autocad/.

[14] C. A. Hilzerman, «OVERKILL command tutorial,» Los mejores tips de AutoCAD, 4 February 2014. [Online]. Available: http://tipsdeautocad.blogspot.com.es/2014/02/suprimir-objetos-duplicados.html.

[15] «.svg,» Wikipedia®, 24 June 2017. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Scalable_Vector_Graphics.

[16] K. D. D. S. a. H.-S. P. W. Mimi X. Yang, «Rapid Prototyping Tape Stencils for the Application of Solder Paste. International Symposium on Microelectronics,» iMAPSource, vol. 2017, nº 1, pp. 000652-000658, 2017.

[17] P. Wallich, «DIY Laser Engraver,» IEEE Spectrum, 2012. [Online]. Available: https://spectrum.ieee.org/geek-life/hands-on/diy-laser-engraver

[18] LNA Design based on Mini-Circuits PSA-4 4053: https://github.com/ZdenekBrichacek/PCB-LNA-PSA4_5043

Teaching opportunities in measurements of magnetic field

David Aguilera Jiménez
GranaSAT Aerospace Group
University of Granada
Granada, Spain
daguilera.jmz@gmail.com

Andrés Roldán Aranda
Electronics Department
University of Granada
Granada, Spain
amroldan@ugr.es

***Abstract*—The measurement of magnetic fields is a complex activity, which can be of significant didactical value. The interference of the numerous sources of magnetic field around the measuring site requires a deep understanding of the fundaments of electronic instrumentation and the particularities of the measurement of magnetic fields. The proposed experimental set-up, which makes use of a 3-axes magnetometer controlled from an Arduino board, also gives the students the chance to practice embedded programming.**

Keywords—Magnetic field measurement, 3-axes magnetometer, Helmholzt Coils, Geomagnetic field, electronic instrumentation, engineering education.

I. INTRODUCTION

The proposed lab is thought for Telecommunications or Electronics Engineering degrees, but it can also be used in other science studies, like in Physics degree lab courses. In particular, the presented set-up will be included as a practical module in the *Aerospace Electronics* course of the Electronics Engineering Master of the University of Granada. The aim of the lab is to develop interdisciplinary skills of the students, preparing them for solving real engineering problems. More specifically, the objectives are:

- To put into practice the fundamentals of the electronic instrumentation and magnetic fields.
- To learn how to identify the relevant sources of information and obtain the necessary data for the experiment.
- To develop theoretical results or simulations of the problem.
- To analyze critically the results and compare them with the theory and simulations.
- To offer a contact with a real engineering project.

With regard to the last objective, the lab serves as an introduction to aerospace projects, which is a possible professional activity of the participating students after their graduation. In particular, the sources of magnetic field of interest in this case are magnetorquers, used for attitude control of satellites. Fig. 9 and Fig. 10 show the 1U and 3U embedded magnetorquers for CubeSats used in this lab as sources of magnetic field.

The measurement of magnetic fields presents a number of characteristics making it very attractive for teaching purposes. Whereas the particularities of the digital sensor, such as measuring range, digital resolution, linearity, etc. is comparable to the measurement of other magnitudes, the presence of other magnetic fields other than the source of interest must be taken into account and compensated for. The first source of magnetic interference in the measurement is the Earth's magnetic field or geomagnetic field. It varies with the geographic position and with the altitude. Fig. 1 shows a world map with an overlaying representation of the intensity of the geomagnetic field at the Earth's surface.

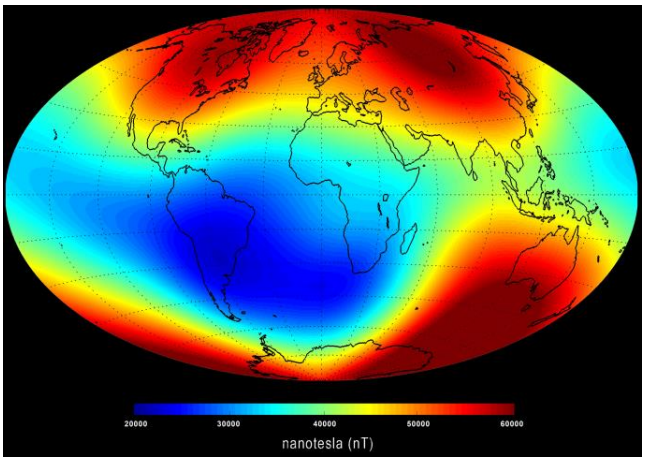


Fig. 1. Magnetic field at the Earth's surface [1]

TABLE I. GEOMAGNETIC FIELD RANGE [2]

Component	*Range*	*Unit*
North Component	[-4, 41]	μT
East Component	[-17, 14]	μT
Vertical Component	[-63, 60]	μT

Additionally, other sources of magnetic interference commonly present at the measurement sites are electronic devices, electric lines or ferromagnetic materials.

II. Experimental set-up

A. Helmholtz Cage

The interference of the geomagnetic field can be compensated with a Helmholtz Cage. Making use of electromagnetic coils, it is able to create the desired magnetic field inside a certain region. The coils may have a circular or a square shape, as Fig. 2 shows.

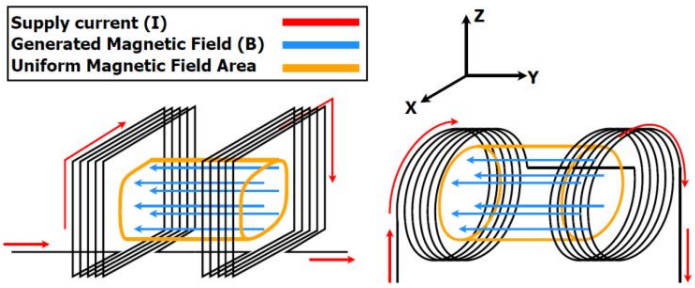


Fig. 2. 1D Helmholtz Coils [3]

With the combination of 6 coils, the three components of a magnetic field can be generated inside a certain volume (3D magnetic field). Fig. 3 shows the dimensions of the volume for the particular case of this GranaSAT's Helmholtz Cage, built following the specifications in [4]. The magnitude and direction of the generated magnetic field is determined by the current circulating on the coils in each axis. Each axis is composed of 2 coils connected in series.

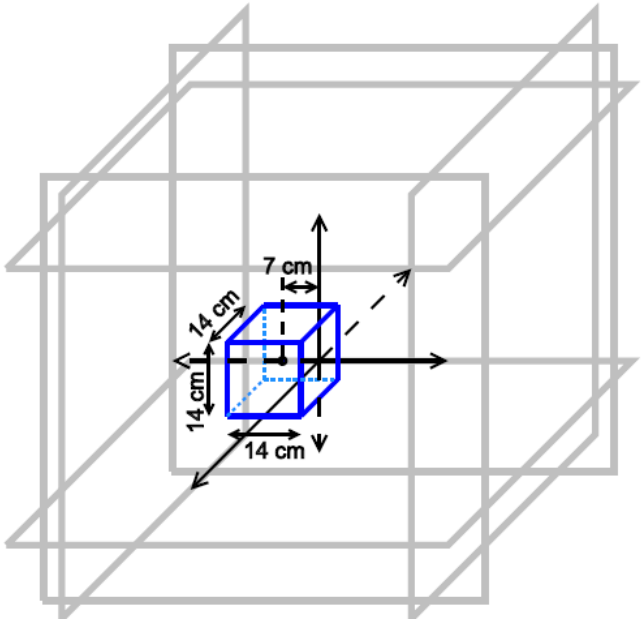


Fig. 3. *Place and size of the volume where the magnetic field is approximated as constant* [3]

Fig. 4 depicts the feed system of the coils to obtain the desired magnetic field in this particular case. A MATLAB script controls the Agilent N6705 variable current source via its GPIB port. The current source feeds each of the axes independently using H-bridges in order to invert the direction of the current if it is needed.

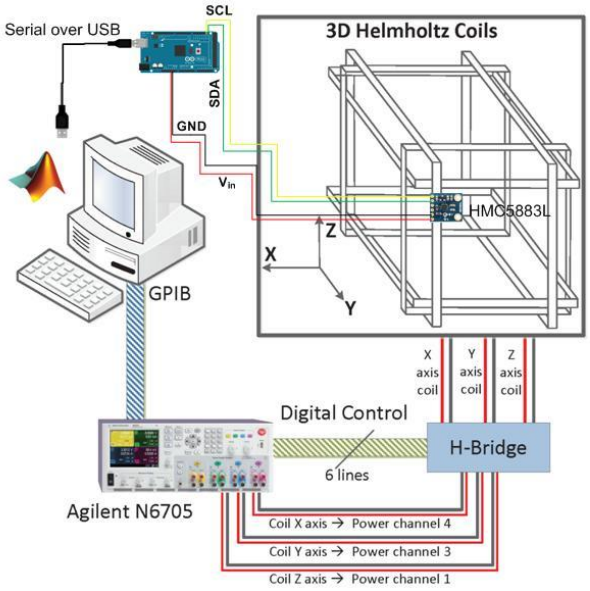


Fig. 4. *Connection between all the used elements* [3]

Fig. 5 shows the Helmholtz Cage in the GranaSAT lab. In order to place the magnetometer and measured components in the region with constant magnetic field without producing additional interference, a non-ferromagnetic support is used, in this case a wood stand.

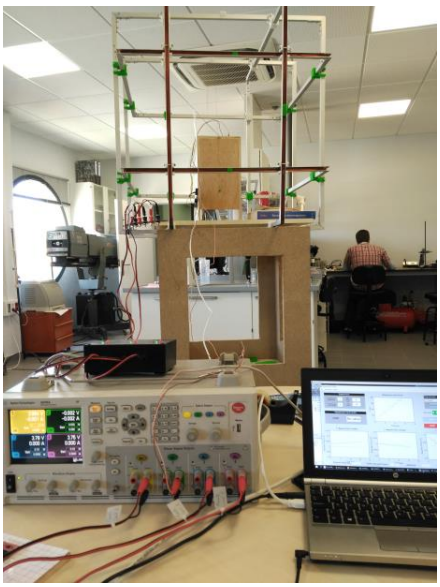


Fig. 5. Helmholtz Coils, current source, H-bridges and Matlab control program

B. Magnetometer

The magnetometer used in the experimental set-up is a HMC5883L 3-axis digital compass, shown in Fig. 6. Among the different magnetic field ranges available, ±0.88 Gauss (88 μT) gives the smallest sensitivity of 0.230 LSb/μT at 12-bit ADC. Its maximum sampling frequency 160 Hz must also be taken into account for measuring varying magnetic fields, but for steady magnetic fields, as in this case, this parameter has minor relevance.

The digital pressure sensor BMP180 is also integrated in the same box in order to obtain further climatic physical magnitudes, which can be relevant for the measurement.

Both sensors are controlled from an Arduino Mega 2560 board using the I2C protocol. A serial connection between the Arduino board and MATLAB permits receiving the samples on a PC as well as sending commands with the appropriate settings for each particular measurement.

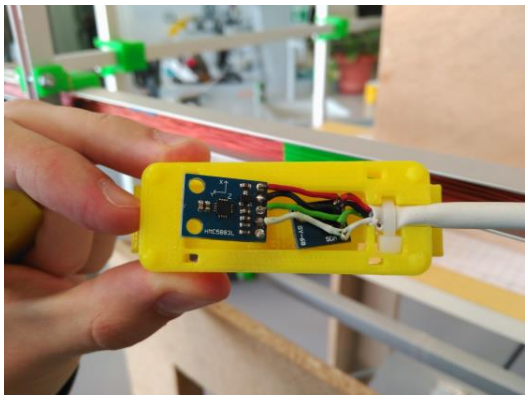


Fig. 6. HMC5883L magnetometer and BMP180 barometer

1) Calibration

A compensation for magnetic interferences other than the geomagnetic field can be performed using a soft-hard iron technique. Since the magnetic interferences depend on the material and equipment close to the experimental site, the calibration process must be performed in the same spot and with the same distribution of components as during the measurement. The soft-hard iron calibration process is summarized below:

- Retrieval of samples with the uncalibrated magnetometer. The sensor is rotated in *yaw*, *pitch* and *roll*, while it retrieves periodical samples in its 3 axes X, Y and Z. A three degrees of freedom platform like the one in Fig. 7 can be used as support for the magnetometer.
- Calculation of the coefficients of the soft-iron matrix W_{cal} and the hard-iron offset V_{cal} [5].
- The calibrated values B_c are obtained by applying the calibration soft- and hard-iron correction to the uncalibrated samples B_p.

$$B_c = W_{cal}^{-1}(B_p - V_{cal}) \quad (2)$$

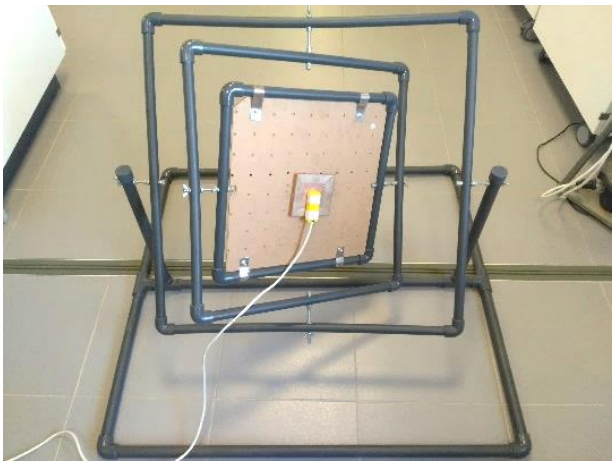


Fig. 7. Three degrees of freedom calibration platform

A polar representation of the samples has the shape of an ellipsoid. A compensation matrix translates the samples into a sphere centered at the origin, as Fig. 8 shows.

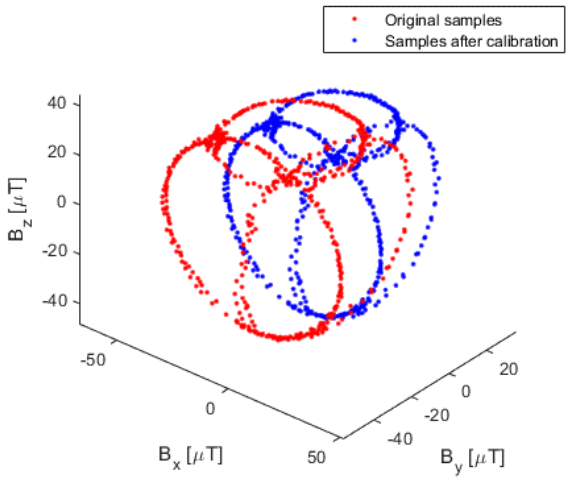


Fig. 8. Magnetometer calibration ellipsoid

To check whether the magnetometer calibration has been correctly done, each of its axis can be oriented to one of the components of the geomagnetic field: North, East and Vertical, respectively. The values of the measured magnetic field should now be the same as the geomagnetic field at that geographical coordinate, which can be obtained using the World Magnetic Model (WMM) or the International Geomagnetic Reference Field (IGRF). For convenience, online tools like the NOAA's Magnetic Field Calculator can be used [6]. After calibrating, a certain residual field is still present but it can be neglected if its value is small. Table II gives the values of the geomagnetic field in the experimental site.

TABLE II. GEOMAGNETIC FIELD VALUES

Component	***Value[a] [μT]***	***Residual field [μT]***
North Component	27.38	-0.05
East Component	-0.30	-0.12
Vertical Component	33.70	-0.09

[a] Values at the GranaSAT Lab. Granada, Spain (Lat.: 37° 08' 38" N, Lon.: 003° 36' 24" W, Altitude: 675m). Date: November 28st 2017. [6]

C. Magnetorquers

The process described can be used for the measurement of any source of magnetic field fitting in the Helmholtz Cage. In the case of this lab, embedded magnetorquers for 1U and 3U CubeSats were chosen. They are coils embedded in PCBs with squared and rectangular shapes, respectively, complying with the CubeSat design specifications [7]. The PCBs are then used as holders of the solar panels of the satellite. Fig. 10 shows a 1U embedded magnetorquer with its solar cells mounted and the magnetometer on top. The advantage of this type of magnetorquer, in comparison with non-embedded models, is the reduction of size and space.

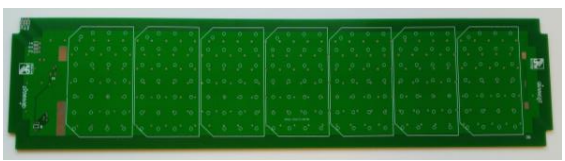


Fig. 9. 3U embedded magnetorquer

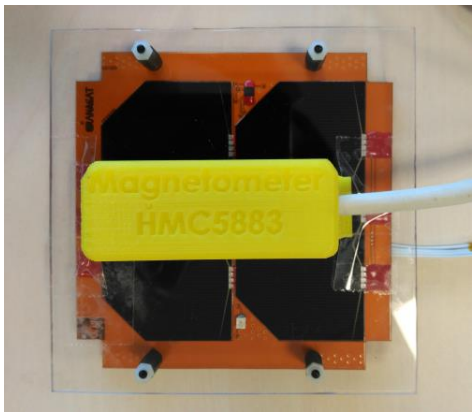


Fig. 10. 1U embedded magnetorquer with solar cells mounted

III. MEASUREMENT

The procedure to measure a magnetic field is described in the following steps:

1) Allignment of components

The magnetometer must be placed inside the volume in the Helmholtz Cage with uniform field. The magnetometer axes must be aligned with the axes of the Helmholtz Cage, as shown in Fig. 11. The aim of this lab is to determine the intensity of the magnetic field in the center of the magnetorquer. Therefore, the magnetorquer is also placed in the center of the volume shown in Fig. 3 and the magnetometer centered on its top or its bottom. Fig. 12 shows a photo of the components inside the Helmholtz Cage, with the magnetometer placed under the magnetorquer board.

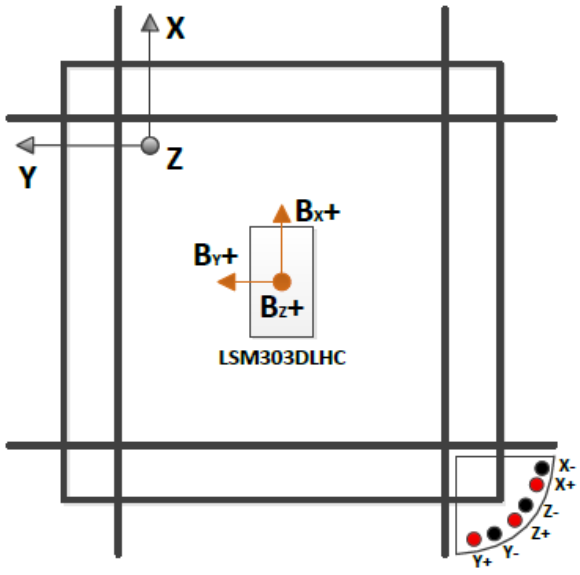


Fig. 11. *Layout for the measurement process* [3]

2) Cancellation of the geomagnetic field

The power source, controlled by MATLAB through a GPIB interface, feeds the coils of the Helmholtz Cage. Each axis is fed from a different channel, as it can be seen in Fig. 4, so that each component of the geomagnetic field is cancelled independently.

The MATLAB routine retrieves periodic samples from the magnetometer and the value of the current in each axis is changed until the measured value of each component of the magnetic field is as close as possible to zero.

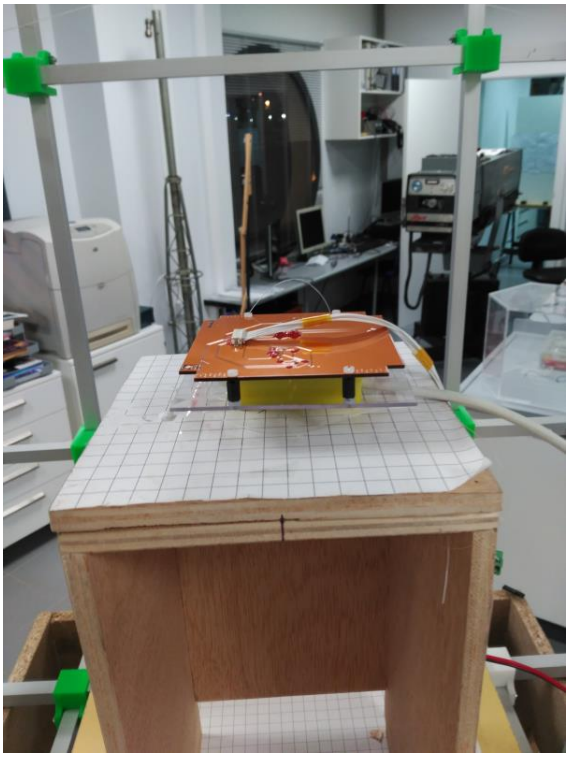


Fig. 12. Magnetometer and 1U magnetorquer inside the Helmholtz Cage

3) Measurement

Fig. 13 shows the MATLAB GUI, which allows to control the input of the magnetorquer as well as to visualize the measured values of the magnetic field as the samples from the magnetometer are retrieved.

Once the appropriate currents in each axis for cancelling the geomagnetic field have been found, the magnetic source of interest can be measured. The values can be seen in the *Calibration Current* panel and the residual geomagnetic after cancelling is displayed as *Residual* B_x, *Residual* B_y and *Residual* B_z.

The magnetorquer is fed from an additional channel of the Agilent N6705 source. In the *Source parameters* panel, the input source can be configured as current controlled (CC) or as voltage controlled (VC). A step function can be set, introducing the initial input voltage, the end input voltage and the voltage increase in each step. In this case, it was of interest to feed the magnetorquer with 3.3 V and 5 V, which are usual power values in CubeSats. The *Magnetorquer Input Current* graphic shows the values of the input voltage and input power.

The *Magnetometer – Order of Magnitude* panel allows to configure the field range of the magnetometer. In this case, the smallest range ±0.88 Gauss (±88 μT) is sufficient to measure the generated magnetic field and is the optimal for obtaining the smallest resolution [8].

The graphics in the bottom half of the GUI display the values of the measured magnetic field in real time as the samples are received. In the center of the magnetorquer, where the magnetometer is placed, the generated magnetic field has a direction perpendicular to the PCB panel. Therefore, the values in the X and Y axes are close to zero, whereas in the Z axis the values of the magnetic field correspond to the contribution of each segment of the measured coil. A high value of the

magnetic field in the X or Y axes indicates a misalignment of the components.

The magnitudes at the bottom of the GUI are obtained from the BMP180 digital pressure sensor. Their function is to complement the magnetic field measurement with ambient information.

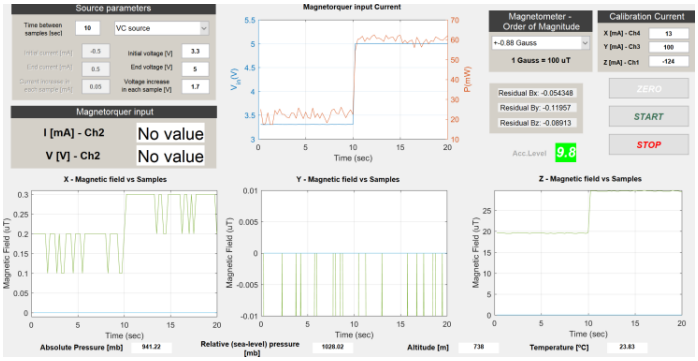


Fig. 13. Matlab GUI

IV. Magnetic Simulation

The results can be compared with the theoretical expected value, obtained from the Biot-Savart equations, and with a magnetic solver, like ANSYS Maxwell. The second has the advantage to be suitable for complex geometries of the magnetic source. The model can be built directly on the program or imported from a compatible CAD file. For the case of the embedded magnetorquers, which were designed using Altium Designer, they can be exported to AutoCAD files and then imported directly to ANSYS Maxwell.

A magnetostatic simulation allows to obtain the value of the magnetic field at any desired point and also to plot the field directly in the 3D model. Fig. 14 shows a vectorial field plot.

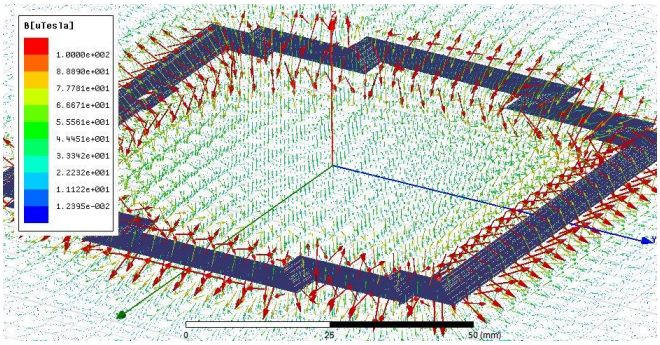


Fig. 14. ANSYS Maxwell simulation with field vector lines plotted

The following list summarizes the preparation of the simulation:

1. Import the geometry from the CAD file.
2. Join the terminals using the geometrical blocks available on the program.
3. Change the material properties of all objects to copper.
4. Define the voltage source.
5. Define the room where the simulation will be executed. Change its material to air.
6. Define the simulation parameters.
7. Simulate and plot the desired results.

The calculated values of the magnetic field can be obtained at any desired position. In this case, it is of interest to determine it at the center of the coil for different distances from the magnetorquer plane (in the Z axis). This simulates the separation of the magnetometer and the magnetorquer plane. The value of the magnetic field at the center of the magnetorquer as a function of the distance from the plane are given in Fig. 15 for inputs voltages V_{in} of 3.3 V and 5 V.

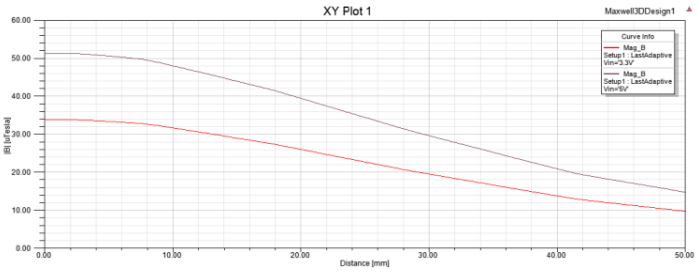


Fig. 15. ANSYS Maxwell simulation linear magnitude B values.

V. Further Development

There are additional elements with didactical value that could be introduced in the course.

A. Solar simulator

It is interesting to determine the effect that the power generation of the solar cells has on the generated magnetic field. For this, the panels can be illuminated with a spotlight acting as a Sun simulator. Fig. 16 shows a photo the spotlight illuminating the magnetorquer board, which is inside the Helmholtz Cage.



Fig. 16. Sun simulator illuminating a magnetorquer in the Helmholtz Cage

B. Air bearing testbed

The force produced by the interaction between the magnetorquer and the geomagnetic field could be measured using an air bearing testbed. It provides a friction-free environment in 2 axes, allowing to measure the angular speed generated by the magnetorquers in the presence of an external magnetic field. It can be placed directly inside the Helmholtz Cage too, since its materials are non-ferromagnetic and do not interfere with the magnetic field. A 3D representation of an air bearing testbed is shown in Fig. 17.

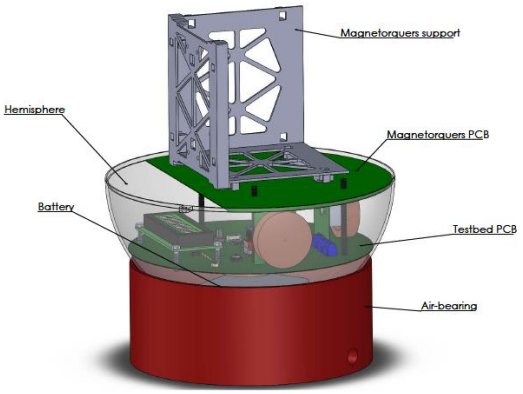


Fig. 17. Air bearing testbed [9]

VI. Conclusions

The presented lab intends to provide engineering and science students with a global view of the process to solve a real problem. A background in different disciplines is therefore necessary to accomplish the proposed tasks: electronic instrumentation, theory of magnetic fields or embedded programming are some of the fields of knowledge that the participants have to put into practice to successfully complete the course. A simulation is also proposed in order to compare its results with the ones obtained experimentally. To conclude, two additional experiments are proposed as an extension of the measurements of the magnetic field. All these activities are expected to reinforce the student's knowledge of the theory in the mentioned disciplines as well as to provide them with a procedure to accomplish the characterization of an electronic component, more particularly, a satellite actuator.

The characterization of embedded magnetorquers for 1U and 3U CubeSats also serves as an example of a practical application of electronics in space missions. This field is usually very attractive to the students and this project aims to take advantage of that to boost their motivation.

Acknowledgment

The experiments and the testbed were supported by GranaSAT Aerospace in collaboration with the Telecommunication Master Student office. The authors also gratefully acknowledge the important contribution of lab technicians of the company DHV Technology.

This research received financial support from the national government of Spain, Project DEEPSAT RTC-2016-4644-3.

References

[1] "Measuring Earth's Magnetism : Image of the Day," 01-Jan-2014. [Online]. Available: https://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=84266. [Accessed: 01-Mar-2018].

[2] National Centers for Environmental Information, "World Magnetic Model - Maps of Magnetic Elements," 2015. [Online]. Available: https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/image.shtml. [Accessed: 01-Mar-2018].

[3] A. Toral Lopez, "Testbed for CubeSAT ADCS with magnetorquers," University of Granada, 2015.

[4] T. T. Li, "Tri-axial Square Helmholtz coil for Neutron EDM Experiment," *Earth*, pp. 1–23, 2004.

[5] T. Ozyagcilar, "Calibrating an eCompass in the Presence of Hard and Soft Iron Interference." NXP.

[6] "NCEI Geomagnetic Calculators." [Online]. Available: https://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#igrfwmm. [Accessed: 01-Mar-2018].

[7] CalPoly, "Cubesat design specification," *CubeSat Program, Calif. Polytech. State …*, vol. 8651, no. June 2004, p. 22, 2009.

[8] Honeywell and InvenSense, "3-Axis Magnetoresistive Sensor Datasheet." 2010.

[9] V. Burgos Gonzalez, "Testbed for a 1U Cubesat," University of Granada, 2015.

Monitorización de un sistema de bombeo solar aislado a través de IoT

Carlos J. García-Orellana, Alejandro Asensio-Nieto, Miguel Macias-Macías,
Antonio García-Manso, Horacio González-Velasco y Ramón Gallardo-Caballero
Dpto. de Ing. Eléctrica, Electrónica y Automática
Universidad de Extremadura
Badajoz - SPAIN
Email: cjgarcia@unex.es

***Resumen*—Los Trabajos Fin de Grado (TFG) deben tratar de poner en práctica aquellas competencias que los estudiantes han adquirido en el transcurso de sus estudios de Grado. El presente trabajo expone el desarrollo de un sistema para monitorizar una estación de bombeo solar aislada, con el fin de abordar muchas de las competencias de Electrónica Analógica y Digital. Dicho sistema está basado en el uso de la plataforma Arduino, comunicación GSM hacia *"Internet de las Cosas"* (IoT), sensores de corriente de efecto Hall, medidas de tensión mediante optoacopladores y configuración WiFi. El sistema utiliza una batería recargable como fuente de alimentación e implementa modos de bajo consumo. Se ha estudiado el funcionamiento y precisión de monitorización, así como las estrategias de ahorro de energía.**

I. Introducción

El Trabajo Fin de Grado (TFG) está concebido en muchos planes de estudios actuales como una asignatura más, aunque con sus connotaciones especiales. Quizás dos de las particularidades más relevantes sean, por un lado, su carácter unipersonal, sin docencia presencial. Por otro lado, y en nuestra opinión, más importante, el TFG debe explotar las competencias (o al menos las más relevantes) del Grado cursado por el alumno.
En las Ingenierías, en ocasiones, ha sido un reto el pasar del Proyecto Fin de Carrera al TFG, ya que habitualmente los primeros estaban sobredimensionados para la nueva estructura de Grados, mientras que en los estudios de Ciencias, el TFG es algo nuevo y veces se le da un carácter excesivamente investigador y avanzado. No obstante, pensamos que es cierto que buscar el equilibrio entre todos los aspectos ligados al TFG no siempre es fácil.

I-A. Contexto y competencias del TFG

En el presente trabajo, presentamos la planificación y desarrollo de un TFG para el Grado de Ingeniería Electrónica y Automática (Rama Industrial) de la Universidad de Extremadura. El Plan de Estudios establece que el TFG tendrá 12 créditos ECTS y en el Plan Docente [2], se establece que el TFG debe desarrollar las competencias adquiridas por el estudiante durante el desarrollo de sus estudios. Los graduados en Ingeniería Electrónica y Automática han cursado ampliamente asignaturas básicas de Electrónica Analógica, Electrónica Digital y Control de Sistemas. Han estudiado también desarrollo de aplicaciones con microcontroladores, no obstante, es posible, que en función de las optativas escogidas, no hayan trabajado con los sistema de prototipado rápido actuales y que permiten desarrollar prototipos de productos en poco tiempo.

I-B. Objetivos y requisitos del TFG

Los objetivos que se plantean abordar con el desarrollo del TFG presentado tienen dos vertientes: por un lado, aquellos objetivos relacionados con el desarrollo de las competencias a adquirir por el estudiante, y por otro lado, los relacionados con el sistema a desarrollar en sí.

Objetivos relacionados con las competencias:
El TFG planteado no únicamente aborda el diseño de un sistema Electrónico para una aplicación concreta, sino que principalmente pretende que el alumno pueda poner en práctica las competencias a adquirir con la titulación. En concreto, se pretende que el alumno trabaje las siguientes áreas:

- Se desea fortalecer los conocimientos de Electrónica Analógica mediante el uso de sensores analógicos y amplificadores.
- Se pretende que el alumno adquiera competencias en el desarrollo de aplicaciones de Microcontroladores mediante plataformas actuales de Prototipado Rápido. Los alumnos que han estudiado el Grado de Ingeniería Electrónica y Automática han desarrollado competencias en Microprocesadores (ver [1]), pero no siempre en plataformas de Prototipado Rápido.
- Se desea que el alumno, tomando como base los conocimientos aprendidos durante sus estudios, adquiera competencias en sistemas de comunicación inalámbricos y de *"Internet de las Cosas"* (IoT).
- También se pretende que el alumno desarrolle un proyecto Electrónico completo y terminado, realizando el diseño y montaje completo de un PCB.
- Desarrollar las competencias generales ligadas a la elaboración y presentación del TFG.

Objetivos del trabajo:
El trabajo tiene como objetivo central el desarrollo de un sistema de monitorización de una estación de bombeo

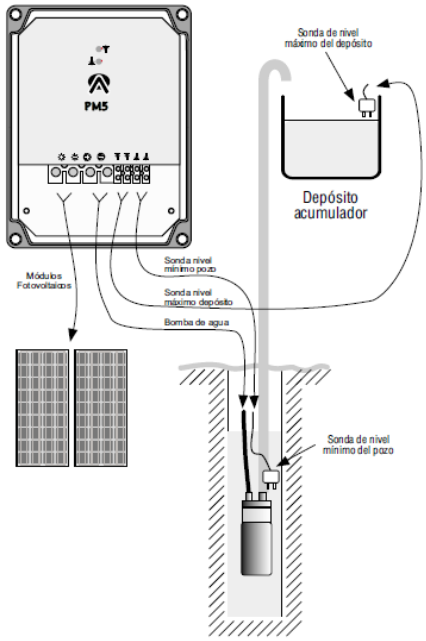


Figura 1. Esquema de la estación de bombeo a monitorizar.

solar aislada. La estación de bombeo está formada por tres elementos principales (ver figura 1):

- Placa solar de 175 Wp. Se trata de una placa solar común, con una tensión en circuito abierto de 45 V y de 36 V en el punto de máxima potencia, en dicho punto, puede ofrecer una corriente de 4.9 A.
- Convertidor DC/DC. Este convertidor tiene como principal función mantener el funcionamiento de la placa solar cerca del punto de máxima potencia, con el fin de aprovechar los límites de funcionamiento del sistema. Se trata del modelo PM5 de Atersa [3].
- Bomba solar SHURFLO 9300. Es una pequeña bomba solar de DC que trabaja a una tensión nominal de 24 V. Aunque su caudal no es muy alto, sí dispone de una buena altura manométrica. Su potencial nominal es de unos 120 W.

El objetivo principal del trabajo es desarrollar un sistema para monitorizar las tensiones y corrientes a la entrada y a la salida del módulo PM5 y subir dicha información a la plataforma de IoT ThingSpeak [4]. Al tratarse de un sistema aislado, la conexión a internet se realizará por GSM.
Como objetivos adicionales se ha incluido un modo de configuración mediante el uso de una red WiFi local y también que la alimentación de todo el sistema se realice mediante una batería de Li-Ion, que deberá ser cargada por la propia placa solar de la instalación existente.
Como se puede comprobar, con el desarrollo de este TFG, el alumno tiene que poner en práctica muchas de las competencias adquiridas durante sus estudios de Grado, y además, deberá adquirir nuevas competencias en base a los conocimientos que ya tiene, principalmente en el campo de las comunicaciones y de *"Internet de las Cosas"*.

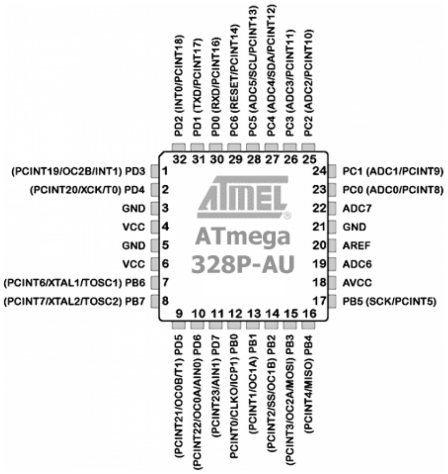


Figura 2. Disposición de terminales del microcontrolador ATmega328P-AU.

En la siguiente sección describiremos los principales componentes utilizados, tanto a nivel hardware como a nivel software. A continuación describiremos, en la sección III, el desarrollo en sí del sistema, destacando los aspectos más importantes. En la sección IV, expondremos los principales resultados y finalizaremos con las conclusiones del trabajo.

II. Principales componentes y software utilizados

En esta sección describiremos de forma general los principales componentes hardware y plataformas software utilizadas en el desarrollo del trabajo.

II-A. Atmel ATmega328P

El microcontrolador elegido como núcleo central para el desarrollo del trabajo es el ATmega328P del fabricante Atmel (ahora de Microchip). Es un microcontrolador de 8 bits y arquitectura AVR, con un buen rendimiento, buenas capacidades de comunicación y un consumo contenido. Las especificaciones detalladas las podemos encontrar en [5] y aunque no las vamos a repetir aquí, si nos gustaría destacar las siguientes:

- Dispone de 32 KBytes de memoria Flash de programa, 2.048 bytes de RAM y 1.024 bytes de EEPROM.
- La tensión de trabajo se sitúa entre 1.8 y 5.5 V.
- La frecuencia de operación de hasta 20 MHz.
- Incluye varios periféricos integrados en el chip: contadores, generadores PWM, buses I2C y SPI, ADC de 10-bit y 8 canales, etc.
- Existe en diferentes encapsulados. Nosotros utilizaremos el TQFP de 32 patillas y montaje superficial, tal y como podemos ver en la figura 2.

Pero la razón por la que el ATmega328P se ha convertido muy popular, es sin lugar a dudas por su uso dentro del proyecto Arduino [6], ya que las placas más sencillas de Arduino, incorporan este microcontrolador.

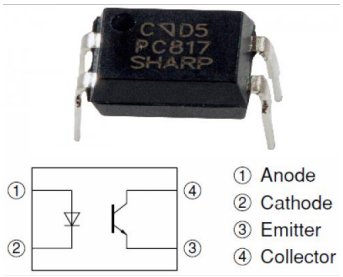


Figura 3. Optoacoplador PC817 utilizado para la medida de tensiones.

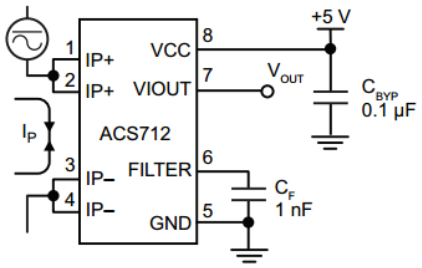


Figura 4. Esquema básico del sensor de corriente ACS712.

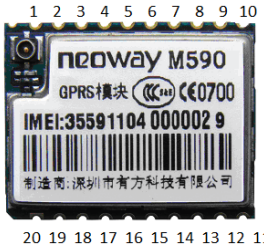


Figura 5. Fotografía del módulo GSM M590 de Neoway.

Lógicamente, la disponibilidad de la plataforma Arduino para el desarrollo del software, es uno de los factores que han influido para decantarnos por este microcontrolador.

II-B. Sensores de corriente y tensión

Dado que uno de los objetivos del TFG es monitorizar tensiones y corrientes, debemos buscar la forma de medir dichos parámetros.

Para la medida de las tensiones, una alternativa viable hubiese sido utilizar un divisor de tensión conectado a una entrada analógica del microcontrolador. Sin embargo, con fin de trabajar con otras alternativas, decidimos utilizar un optoacoplador calibrado. El optoacoplador utilizado fue el PC817, un modelo bastante estándar y que podemos ver en la figura 3. Como principal ventaja del optoacoplador debemos destacar, lógicamente, su aislamiento eléctrico, y como principal desventaja, la necesidad de calibrarlo, ya que su respuesta no es lineal.

El rango de tensiones a medir en la entrada es de aproximadamente de 15 a 50 V, mientras que en la salida (bomba) sería de 5 a 30 V.

Para la medida de las corrientes se ha decidido utilizar un sensor de efecto Hall, en concreto se trata del modelo ACS712 del fabricante Allegro [7]. Hemos elegido el modelo de 5 A, el cual presenta una respuesta líneal en el rango de ± 5 A, que es suficiente para nuestra aplicación, ya que además soporta picos de hasta 5 veces ese valor.

El ACS712 ofrece una salida analógica, centrada en la mitad de la alimentación (usualmente 5 V), lo cual le permite medir corrientes en las dos direcciones, aunque en nuestro caso no sea necesario. La sensibilidad del modelo elegido es de 185 mV/A, el encapsulado es SOIC8 y el esquema de uso es simple (ver figura 4), aunque en nuestro caso, lo amplificaremos para obtener mayor sensibilidad.

II-C. Módulo GSM Neoway M590

Dado que queremos realizar un proyecto basado en “Internet de las Cosas” (IoT), necesitamos algún tipo de conexión a Internet. La solución más sencilla para un entorno aislado, es utilizar telefonía GSM. Como la cantidad de datos a enviar es pequeño en cada ciclo, no necesitamos grandes velocidades de transferencia, por ello, un “modem” GPRS es una solución perfecta.

El modelo elegido es el M590 del fabricante NeoWay [8]. Dicho módulo lo podemos observar en la figura 5 y tiene un coste bastante reducido. El módulo se comunica con el microcontrolador mediante un puerto serie utilizando comandos del tipo AT, y dado que la E/S del módulo funciona a 2.85 V, es necesario el uso de adaptadores de nivel. El M590 permite apagarlo y encenderlo mediante un terminal ON/OFF que posee, con lo cual podemos desactivarlo desde el microcontrolador y obtener un consumo que en nuestro caso es despreciable. Sin embargo, en funcionamiento, el consumo no es nada despreciable, pudiendo tener picos de hasta 2 A, lo cual obliga a incorporar en la alimentación un condensador de gran tamaño.

Desde el punto de vista del software, existen librerías de Arduino para trabajar con él, lo cual simplifica el proceso de desarrollo.

II-D. Módulo ESP8266

Dado que hemos decidido que nuestro sistema pueda ser configurable por el usuario, hemos de incorporar un interfaz de configuración al mismo. De las posibles alternativas, hemos elegido utilizar un interfaz web, creando para ello una red WiFi local cuando entremos en modo de configuración (pulsando un botón).

Para crear esa red WiFi de configuración hemos utilizado un módulo basado en el SoC ESP8266 de Espressif [9]. Este dispositivo es muy popular y utilizado en muchas aplicaciones. Básicamente, el ESP8266 incorpora una solución WiFi, junto a un microprocesador de 32-bit, que además de su bajo coste, es programable mediante el entorno de Arduino.

Sin embargo, en nuestro caso, lo hemos utilizado como simple

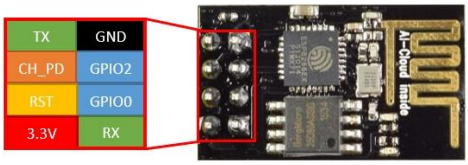


Figura 6. Módulo WiFi ESP-01, basado en el SoC ESP8266.

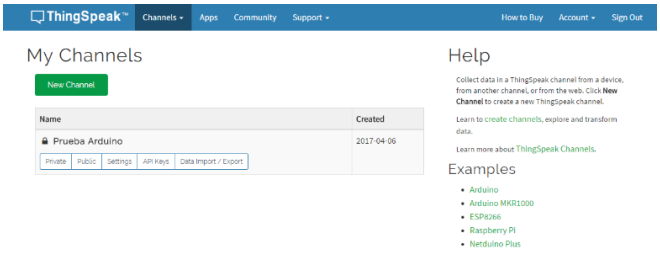


Figura 7. Imagen de una de las página de la plataforma de IoT ThingSpeak.

"modem" WiFi, con un firmware que nos permite comunicarnos desde el ATmega328P por protocolo RS232 y comandos AT. Es decir, no hemos tenido que programar el ESP8266, simplemente lo hemos utilizado como "modem".
En concreto, hemos elegido el módulo conocido como ESP-01 (ver figura 6), y lo hemos incorporado a nuestro sistema.

II-E. Módulos de alimentación

Para la alimentación del sistema hemos decidido utilizar una batería de Li-Ion de 3,7 V, que se recargará mediante el panel solar de la instalación. Para poner en práctica esta solución, necesitamos dos convertidores DC-DC y un módulo de carga, de manera que:

- El primer convertidor DC-DC es necesario para convertir la tensión de suministro del panel solar a los 5 V que necesita el módulo de carga. El módulo elegido está basado en el convertidor *step-down* LM2596HV de HMsemi, que se trata de una versión con voltaje de entrada ampliado del popular LM2596 de Texas Instruments.
- Para la carga de la batería hemos utilizado un módulo basado en el integrado TP4056 de NanJing Top Power, junto con los componentes necesarios para la protección de descarga de la celda de batería.
- El segundo convertidor DC-DC es de tipo *step-up* y es utilizado para convertir los 3,7 V de la batería a 5 V. Está basado en el chip SX1308 de Suosemi.

En la sección III-A podemos ver con más detalle como se utilizan estos módulos.

II-F. Arduino

El software de nuestro desarrollo ha sido realizado mediante el uso de la plataforma Arduino [6]. No hay dudas de que Arduino ha supuesto una revolución en el mundo del Prototipado Rápido mediante microcontroladores.
No nos vamos a extender en describir las características del proyecto Arduino, únicamente indicar que se trata de una plataforma (hardware y software) para desarrollar de forma sencilla proyectos basados en microcontroladores. El proyecto incluye placas de desarrollo y un entorno de programación (IDE) para desarrollar el software, todo ello con licencia libre. El software se desarrolla en una variante del entorno *Wiring*, que al final tiene una sintaxis similar a C.
El gran éxito de Arduino de debe a multiple factores, pero podríamos destacar los siguientes: facilidad de uso, bajo coste, entorno abierto, fácil disponibilidad, existencia de *drivers* para muchos dispositivos, ...
Quizás entre los principales problemas o deficiencias de Arduino podríamos encontrar la ausencia de un entorno de depuración paso a paso, la documentación de algunas librerías, ...
En definitiva, pensamos que Arduino es un entorno adecuado para el desarrollo de aplicaciones no excesivamente complejas en microcontroladores, a pesar de sus limitaciones.

II-G. Plataforma IoT ThingSpeak

ThingSpeak [4] es un elemento clave en nuestro TFG, ya que se trata de la plataforma IoT que hemos elegido para subir los datos a la nube.
El uso de IoT en nuestro proyecto permite que la monitorización pueda ser seguida en cualquier parte del globo con un simple navegador web y nos permite simplificar el sistema al no tener que almacenar localmente los datos.
ThingSpeak nace como un proyecto *open source* en 2010 de la mano de ioBridge. ThingSpeak es una plataforma IoT, organizadas en *canales*, que provee un interfaz web (ver figura 7) para consultar datos almacenados por sensores en dichos canales y poder efectuar algunas acciones en función de esos datos. La plataforma dispone de un API, basado en HTTP, para que los sensores puedan subir o recuperar los datos.
El proyecto ha pasado a ser gestionado por MathWorks Inc., quién ha incluido soporte para el uso de MatLab en el análisis y visualización de los datos. Esto ha provocado que la versión abierta de ThingSpeak no se actualice desde hace 3 años, no obstante, es posible instalar la versión abierta y disponer de un servicio IoT privado.

III. Descripción del trabajo

En esta sección expondremos los aspectos más relevantes del desarrollo del TFG, tanto en la parte hardware, como en la parte software.

III-A. Desarrollo del hardware.

Para abordar la descripción del desarrollo del hardware, hemos decidido dividir esta sección en dos bloques diferenciados: por un lado, comentaremos aquellas partes del esquema que nos parecen más importantes, y posteriormente, por otro lado, nos centraremos en el diseño, fabricación y montaje de la PCB del sistema.
La estructura global del sistema la podemos observar en la figura 8.

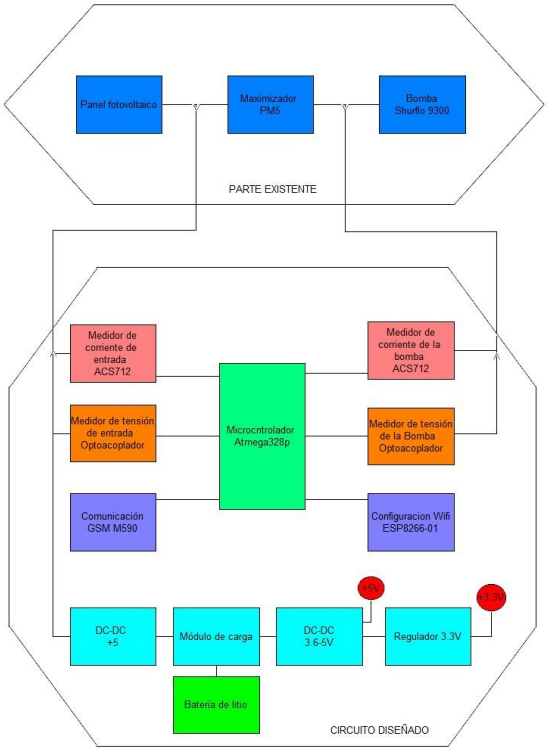


Figura 8. Diagrama de bloques de la estructura hardware del sistema diseñado.

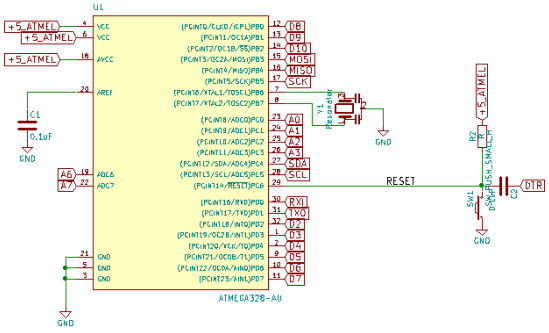


Figura 9. Esquema de la parte del microcontrolador ATmega328P.

III-A1. Esquemas más importantes:

Comenzamos con el esquema del microcontrolador, que podemos ver en la figura 9. Tenemos poco que comentar respecto a esta parte, ya que además del microcontrolador, incluye el resonador de 16 MHz y el *reset*.

El siguiente esquema que incluimos lo tenemos en la figura 10, y como podemos observar corresponde a la parte de medición de las tensiones con optoacopladores, que también es sencillo y no hay mucho más que explicar al respecto.

A continuación, en la figura 11, mostramos la parte co-

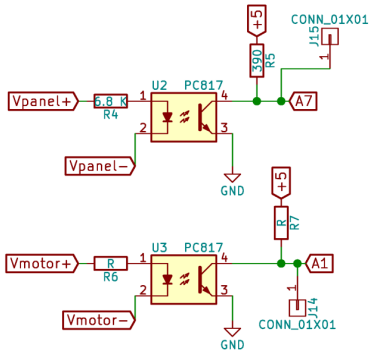


Figura 10. Esquema de para la medición de las tensiones mediante optoacopladores.

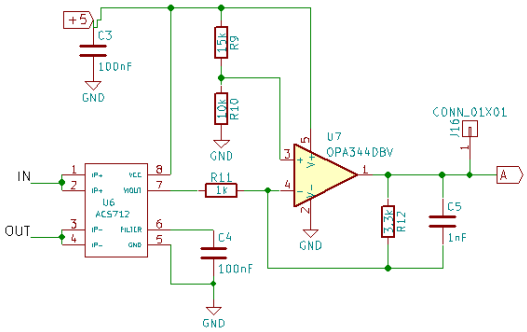


Figura 11. Esquema de la parte del sensor de corriente.

rrespondiente a uno de los sensores de corriente ACS712. Como podemos observar, hemos incluido un amplificador que además de aumentarnos la sensibilidad, nos desplaza la señal, de forma que cuando no hay corriente, el valor de la tensión está cercana a cero en lugar de en mitad de la alimentación, aumentando de esta forma el rango de trabajo.
El único problema de hacer esto así es que solamente podemos medir corrientes en un sentido, lo cual, en nuestro caso no es ningún inconveniente.

En la figura 13 se muestra el esquema de correspondiente a los módulos de comunicaciones GSM (NeoWay M590) y WiFi (ESP-01). En ambos casos, se utilizan transistores bipolares SMD para activar o desactivar los módulos.

El último esquema que mostramos lo podemos ver en la figura 12. El él podemos observar los dos convertidores DC-DC utilizados, módulo de carga de la batería, la batería, un regulador 3,3 V (para el ESP-01) y dos relés (uno de estado sólido y otro convencional). Respecto a los relés, indicar que realmente solamente se utilizó uno de ellos, ya que el objetivo del relé es cortar la alimentación cuando el microcontrolador está dormido. Se decidió incluir los dos en la PCB por si el funcionamiento final del de estado sólido no era totalmente satisfactorio (por su resistencia conectado), aunque finalmente el funcionamiento fue correcto.

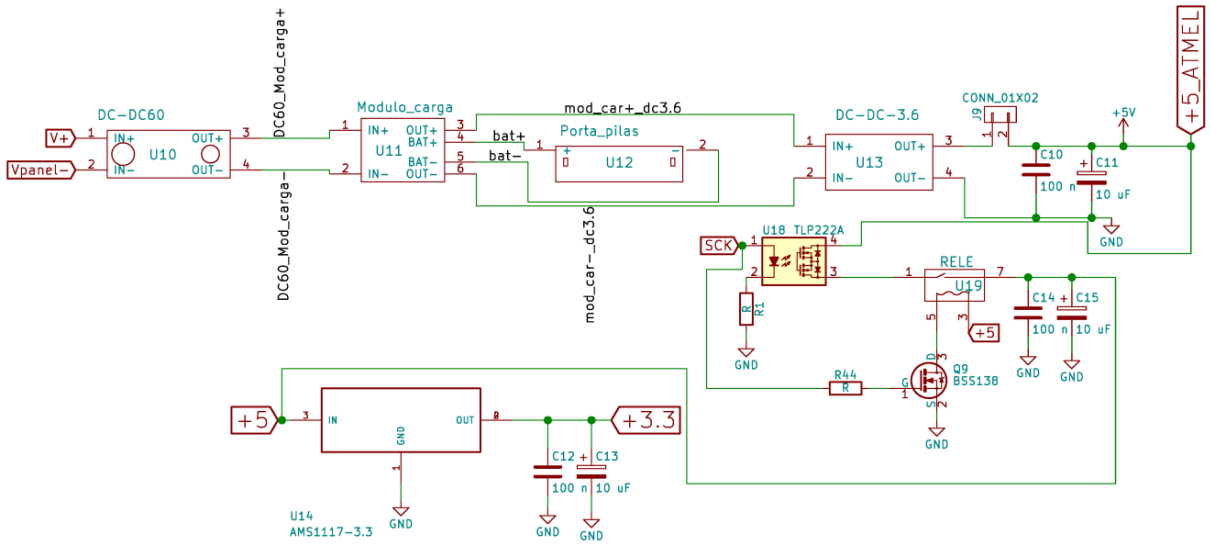


Figura 12. Esquema de la parte de alimentación de sistema.

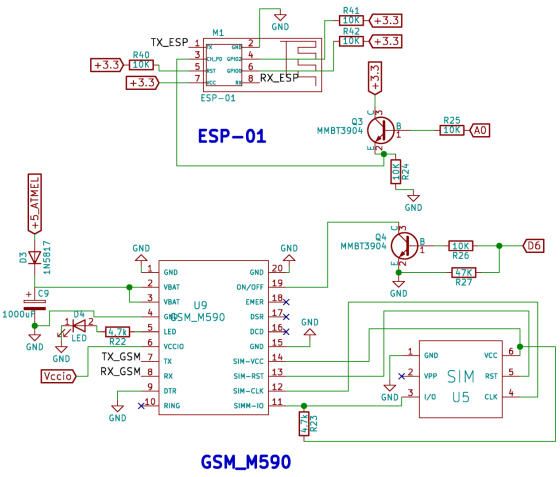


Figura 13. Esquema del módulo GSM y del módulo WiFi.

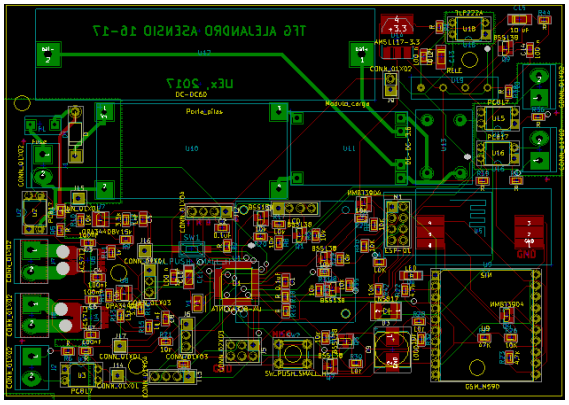


Figura 14. Diseño del PCB realizado con el programa KiCad.

III-A2. Diseño y fabricación del PCB:

Aunque los test de cada parte del circuito se hicieron mediante el montaje en *protoboard* y con un Arduino Mini, una parte importante del TFG era el diseño, fabricación y montaje del circuito completo en un PCB. Se decidió que los componentes debían ser en su mayor parte de montaje superficial y que el PCB sería de doble cara. Pensamos que para el alumno es muy formativo y satisfactorio plasmar todo el desarrollo de esta manera, que lo acerca más a un producto final.

Para el diseño del PCB se utilizó el programa de código abierto KiCad [10], este programa de diseño funciona muy bien y además es multiplataforma. El diseño del PCB podemos observarlo en la figura 14.

Para la fabricación se utilizó una fresadora ProtoMat H100 de LPKF [11], la cual permite de forma bastante automatizada la fabricación de PCBs de doble cara. El resultado del fresado lo podemos observar en las figuras 15 y 16. Como se observa en ambas el resultado es bastante satisfactorio.

La soldadura de los componentes se realizó utilizando un horno de refusión y el resultado final lo podemos observar en la figura 17, ya incluido en la caja diseñada y fabricada por impresión 3D.

III-B. Desarrollo del software

El desarrollo del software se ha realizado mediante el entorno de Arduino, incorporando las librerías necesarias, principalmente para el manejo del módulo GSM, para la creación de puertos serie por software y para gestionar el consumo del ATmega328P.

El software ha sido desarrollado como una máquina de estados

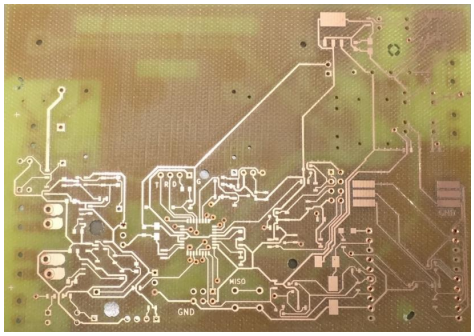


Figura 15. PCB fabricado (vista del lado de los componentes).

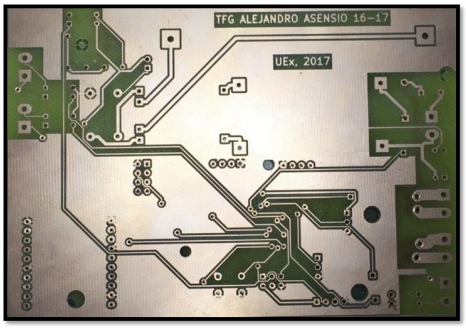


Figura 16. Imagen del PCB por lado de las soldaduras.

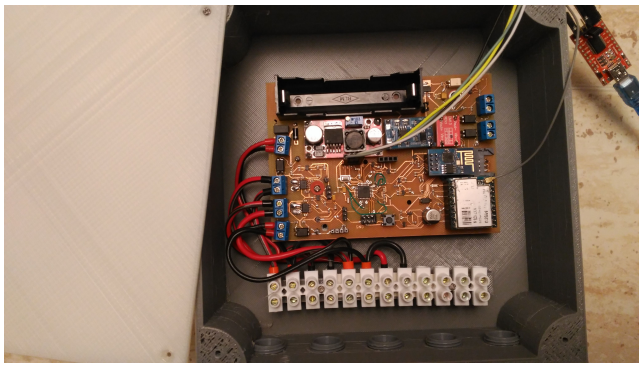


Figura 17. Resultado del sistema desarrollado una vez finalizadas las soldaduras y montado en la caja realizada mediante impresión 3D.

y en la figura 18 podemos ver un diagrama del mismo. Como se observa en dicha figura el estado principal es el de *"Medida"*. En dicho estado el sistema, cada cierto tiempo, despierta realiza las medidas (filtrándolas mediante un filtro de media), arranca el módulo GSM, sube los datos a la plataforma IoT y acaba el ciclo entrando en el modo de bajo consumo del microcontrolador.
El resto de estados se utilizan en el modo de configuración, al que se accede por interrupción mediante un pulsador.

IV. Resultados

En los TFGs cuyo objetivo es el desarrollo práctico de una aplicación, el resultado principal es en muchas ocasiones el

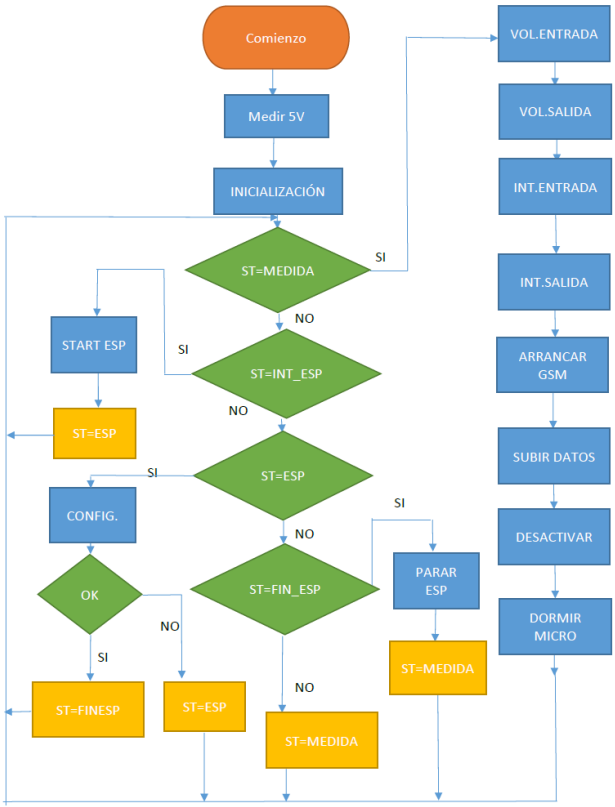


Figura 18. Diagrama de bloques general del software desarrollado.

desarrollo en sí mismo. No obstante, en el TFG que presentamos se optó por incluir resultados adicionales relacionados con la calidad de las medidas y el consumo del equipo. Se consideró que incluir este tipo de resultados adicionales es formativo para el alumno porque se le transmite la idea de que, además de funcionar, hay que estudiar con cierto rigor cómo de bien funciona.

IV-A. Resultados de la calibración de los sensores

Las pruebas de calibración y test de los sensores de tensión y corriente se realizaron en el laboratorio mediante una fuente de tensión, un conversor DC-DC *step-down* y utilizando, como carga, bombillas de 12 V (ver figura 19).

Los sensores de tensión, basados en el uso de optoacopladores, necesitan una calibración de la curva de respuesta. Dicha curva tiene una zona más lineal en la que se encuentra la zona principal de trabajo, tal y como se puede observar en la figura 20. El proceso de calibración consiste en almacenar en una tabla los valores medidos en el ADC del microcontrolador para diferentes tensiones de entrada al sensor (se tomaron cada voltio). Con estos datos se construye una tabla de búsqueda y para obtener el resultado de una nueva entrada se interpola entre los cercanos. De esta forma se consiguen, para ambos optoacopladores, errores menores del 2 % en la zona de trabajo. Sin embargo, para tensiones fuera de dicho rango los errores pueden ser mayores del 10 %.

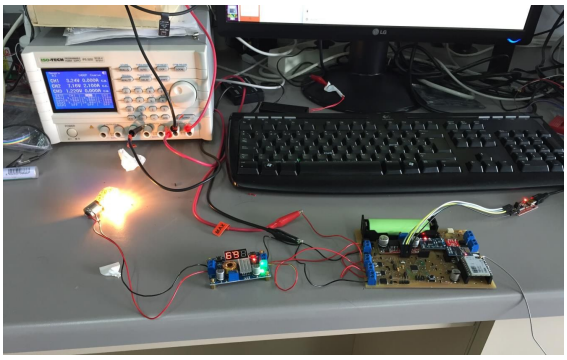


Figura 19. Fotografía del montaje para el test del sistema.

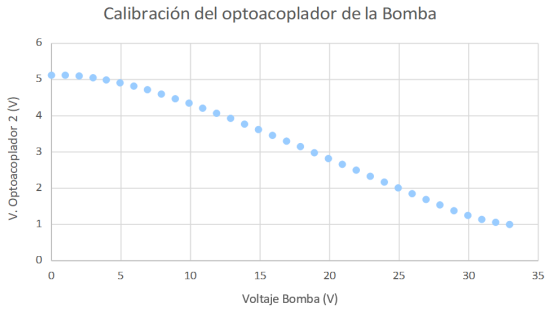


Figura 20. Característica de transferencia del sensor de tensión correspondiente a la salida.

Respecto a los sensores de corriente, éstos muestran una buena linealidad entre la corriente y la tensión a la salida del mismo. No obstante, se realizó un ajuste lineal para mejorar el resultado, ya que la sensibilidad real de los ACS712 no era de 185 mV/A, sino de 133 mV/A, lo cual puede deberse a una partida defectuosa o a que no eran originales. El error obtenido en este caso es mayor, obteniendo un error máximo de alrededor de un 5 % para corrientes mayores de 0,4 A.

IV-B. Estudio del consumo

Para completar el estudio del sistema se procedió a estudiar el consumo real del circuito durante un ciclo de funcionamiento. Se estudiaron varios escenarios y en el más favorable, considerando un reposo de 2 minutos, se obtuvo que la duración de una batería de 2.400 mAh podría llegar a 56 horas. Tal y como se puede observar en la figura 21 durante el proceso de medida y subida de datos el consumo medio es de alrededor de 170 mA. Sin embargo, durante el reposo el consumo es de apenas 350 μA, ya que se desactiva el módulo GSM y mediante el relé, el resto de componentes.
La duración estimada de la batería cumple sobradamente con las necesidades de nuestro sistema, ya que el mismo se recargará, prácticamente con total seguridad, todos los días.

V. Conclusiones y trabajo futuro

Con el desarrollo del TFG expuesto en este trabajo podemos concluir que el alumno trabaja con muchas de las competencias de la Electrónica actual. La combinación de sistemas

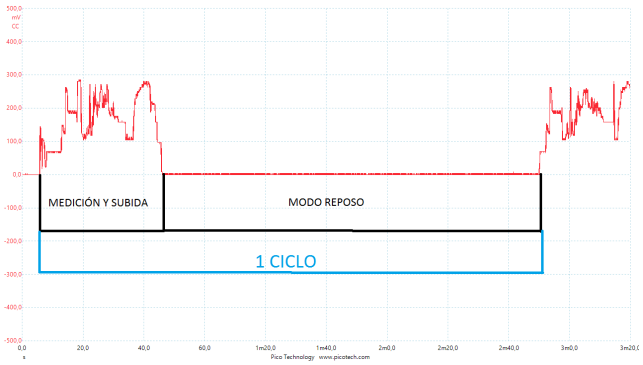


Figura 21. Consumo durante un ciclo de medida, desactivando todos los periféricos.

Analógicos y Digitales permiten al alumno poner en práctica y afianzar muchos de los conocimientos adquiridos. Además, la necesidad de utilizar herramientas y elementos no incluidos en los estudios de Grado, obligan al alumno a esforzarse en seguir aprendiendo, algo que posiblemente deberá realizar durante toda su vida laboral. No debemos tampoco olvidar la satisfacción que para el alumno supone el ver culminado un desarrollo como el que hemos presentado.
Evidentemente, este tipo de TFGs requiere la implicación y trabajo del Tutor, ya que, aparte de la planificación y directrices del diseño, debe guiar (y *"desatascar"* en muchas ocasiones) al alumno, consumiendo un tiempo que no es valorado por la Universidad (aunque sí por el alumno).
De cara al futuro, pensamos continuar desarrollando este tipo de TFGs por sus importantes cualidades formativas.

Agradecimientos

El presente trabajo ha sido parcialmente financiado por la Junta de Extremadura y FEDER a través de la ayuda a Grupos de Investigación.

Referencias

[1] Memoria verificada del *Grado en Ingeniería Electrónica y Automática (Rama Industrial)*. https://www.unex.es/organizacion/gobierno/vicerrectorados/vicecal/archivos/ficheros/informacion-titulos/eii/plan0817/memoriaplan.pdf
[2] Planes de estudio de la *Escuela de Ingenierías Industriales (UEX)*. https://www.unex.es/conoce-la-uex/centros/eii/informacion-academica/programas-asignaturas.
[3] Manual del conversor DC/DC *PM5* de Atersa. http://atersa.eu/img/2011121165145.pdf.
[4] Página web oficial de la plataforma IoT *ThingSpeak*. http://www.thingspeak.com/.
[5] Información técnica del *ATmega328P*. http://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328p.
[6] Página web del proyecto *Arduino*. http://www.arduino.cc.
[7] Información técnica del sensor *ACS712* de Allegro. https://www.allegromicro.com/en/Products/Current-Sensor-ICs/Zero-To-Fifty-Amp-Integrated-Conductor-Sensor-ICs/ACS712.aspx.
[8] Datasheet del módulo *M590* de NeoWay. http://cyntech.co.uk/downloads/neoway-m590-hardware-design-manual-v1.pdf.
[9] Información del SoC *ESP8266* de Espressif. https://www.espressif.com/en/products/hardware/esp8266ex/overview.
[10] Página del proyecto *KiCad*. http://kicad-pcb.org/.
[11] Descripción de la fresadora *ProtoMat H100* de LPKF. http://www.lpkf.es/productos/creacion-rapida-prototipos-pcb/plotter-fresadora/protomat-h100.htm.

e-Kart
Trabajo colaborativo I+D+m^{+} basado en la metodología de proyectos

Ricardo-Miguel González Rodríguez
Dto. Transporte y Mantenimiento de Vehículos Automóviles
Centro Integrado de Formación Profesional La Laguna
San Cristóbal de La Laguna - España
rmgonzalezrodriguez@coiitf.es

Jesús Artemio González Vega
Dto. Transporte y Mantenimiento de Vehículos Automóviles
Centro Integrado de Formación Profesional La Laguna
San Cristóbal de La Laguna - España
jgonvegj@gobiernodecanarias.org

***Abstract*—Este trabajo es un proyecto metodológico de características I+D, en el ámbito de las enseñanzas de la formación profesional reglada que, basado en los principios del trabajo colaborativo y del método de proyectos, persigue una mejora sustancial de los resultados de aprendizaje entre los jóvenes que cursan sus estudios en la rama de automoción. En síntesis, la meta del proyecto consiste en el diseño y fabricación de un pequeño bólido, de tipología kart, propulsado por un motor eléctrico con autonomía suficiente a la duración de las actuales competiciones de estos minibólidos dotados con motor de explosión**

***Index Terms* — trabajo colaborativo, método de proyectos, vehículo eléctrico, mejora de los resultados de aprendizaje, buenas prácticas docentes**

I. Introducción

Esta iniciativa constituye una gran oportunidad para aunar y poner en práctica todos los principios metodológicos^{+} que se persiguen y propugnan en los modelos de ***buenas prácticas docentes***, reforzados con los líneas marcadas por el proyecto gubernamental *Enlaza de empleabilidad a través de la formación profesional*. La excusa principal de este trabajo consiste el el diseño y fabricación de un e-Kart eléctrico con autonomía similar a los go-kart de combustión. Con la puesta en marcha de este proyecto nos proponemos realmente los siguiente objetivos:

- la mejora de los resultados de aprendizaje en conocimientos, capacidades y competencias

- el fomento de la iniciativa, la autonomía, investigación y la familiarización con el trabajo en equipo.

- utilización de recursos didácticos y materiales variados y adecuados

- facilitar la conexión del aprendizaje con la realidad del entorno social y profesional

- el refuerzo de aprendizajes procedimentales aplicando la teoría a la práctica.

- la creación de un clima de optimismos y confianza que fomente la participación activa en el contexto educativo del aula/taller

- el fomento de una educación y una formación abierta e innovadora

- la mejora de la calidad educativa mediante una inversión sostenible y eficiente.

II. Resultados obtenidos y problemas encontrados

El comienzo de la experiencia parte de una *idea de pasillo* que al profesorado promotor le resulta ilusionante por tener la característica de ser un adecuado problema que estimula la exploración y reflexión, que parece lo suficiente complejo, y de suma actualidad, que puede producir verdadero significado en la construcción del conocimiento en el área que se trata por medio de los lógicos debates y justificadas discusiones. Esta actividad obliga a interactuar entre los distintos departamentos, trabajar conjuntamente aplicando sus conocimientos combinados a la solución del problema. Esto permite al alumnado de las distintas especialidades a participar de forma conjunta y flexible en la obtención de un resultado y meta común. Una vez definido el proyecto, comienzan las dificultades propias de este tipo de metodologías como fueron: la toma de decisiones, la asignación de roles, reparto de tareas y el desenvolvimiento de las actividades. Esta fase del proyecto ocupó un tiempo que, pudo parecer demasiado largo y complejo y que, en algunos momentos, hizo peligrar la ejecución de la idea hasta que poco a poco se logró una organización natural que permitió establecer un plan de trabajo definido.

A partir de ese momento, que ocupó hasta la finalización del curso académico 2016/2017, se logró la meta inicialmente prevista que consistió en la construcción de la primera versión

de un prototipo de bólido, con tipología de un go-kart de competición, dotado de un motor eléctrico de 30 kW pico (12 kW continuo) alimentado por un grupo de baterías AGM de tensión total de 84V con una autonomía estimada de 15 minutos. En el diseño y construcción de este pequeño bólido han participado activamente los grupos de alumnado pertenecientes a las especialidades de electromecánica y carrocería del turno de tarde del CIFP La Laguna con el apoyo y asesoramiento de algunas empresas del sector de la ingeniería (RM y Dinamox); de los sectores del metal y electricidad (Repamagri, Canaribat y Coelca) y de diversos profesores del departamento de Transporte y Mantenimiento de Vehículos del CIFP La Laguna. En el momento de la redacción del presente artículo (curso 2017/2018), el prototipo se encuentra terminado en condiciones de realizar las pruebas de seguridad, fiabilidad y rendimiento que permitan verificar, previo ajustes y reformas que se vean necesarias, su correcto y adecuado funcionamiento en pista.

III. OBJETIVOS EDUCATIVOS

Desde el punto de vista curricular, los objetivos planteados están relacionados con los resultados de aprendizaje que se pretenden alcanzar y con el perfil profesional de los títulos que intervienen en el proyecto y que están marcados en los programas de los ciclos formativos de grado medio y superior de la familia profesional de *Transporte y Mantenimiento de Vehículos Automóviles*. Los objetivos más relevantes son:

1. Demostrar las bondades de un sistema eléctrico de propulsión, en un vehículo automóvil, frente a un motor de combustión

2. Incrementar la motivación del alumnado gracias a la metodología de proyectos que proporciona una relación trabajo/resultado

3. Fomentar el trabajo en equipo mediante un objetivo común. Tanto del equipo docente como de cada uno de los grupos clase que participan.

4. Desarrollar el espíritu investigador y emprendedor al crear un vehículo de tecnología innovadora.

5. Profundizar en el conocimiento del vehículo eléctrico como futura tecnología de transporte.

6. Introducción de conceptos de eficiencia energética, almacenamiento de energía, sostenibilidad medioambiental...

IV. PLAN DE TRABAJO/METODOLOGÍA

La esencia del proyecto consiste en la formación de equipos de trabajo que, bajo la tutoría de los distintos profesores responsables de cada área de actuación, realice los estudios, análisis y operaciones para llevar a cabo la tarea asignada que forma parte de un plan global previamente definido. Para llevar con éxito esta labor, el alumnado participante en el proyecto deberá haber cursado previamente la formación necesaria que garantice la consecución de los conceptos y las habilidades necesarias que le permitan el aprovechamiento de la actividad.

Por una parte, la metodología a emplear esta basada en los principios del trabajo colaborativo. Si trabajar en equipo resulta relevante, mucho más es aprender a hacerlo de manera colaborativa.

Este concepto exige mucho más esfuerzo a los profesionales, pero a cambio se consiguen grupos más productivos y eficaces. El trabajo en colaboración configura a los grupos de trabajo de manera flexible según las necesidades de los proyectos y promueve entornos para que la comunicación sea fluida. Pretende crear espacios en los que todos tengan la oportunidad de expresar sus ideas y puntos de vista. Los profesionales han de aportar valor añadido con sus propuestas y que así sirvan para detectar nuevas oportunidades. Es mucho más (y más difícil) que trabajar en equipo. Los profesionales 'colaborativos' han de adaptarse a grupos flexibles, deben responder a objetivos comunes y tienen que contribuir al aprendizaje del resto.

Por otro lado, para llevar a cabo la propuesta metodológica se apuesta por el ***Método de Proyectos de Kilpatrick*** *(Willian Heard Kilpatrick 1918)*

Para Kilpatrick, el proyecto es un acto completo donde se aspira a realizar una actividad entusiasta, con un sentido o propósito específico, que se realiza en un ambiente social. Lo define como: “un plan de trabajo libremente elegido con el objeto de realizar algo que nos interesa”.

Los proyectos, de acuerdo con Kilpatrick, pueden ser de cuatro tipos principalmente:

- Proyecto de creación, de creatividad o de producción (su fundamento es la elaboración de un plan, como puede ser emprender una tarea, actividad, empresa, etc.).

- Proyecto de apreciación, recreación o de consumo (la idea principal es disfrutar de una experiencia estética, como puede ser escuchar una narración, oír música o apreciar una escenificación).

- Proyectos de solución de problemas (obedecen al propósito de darle una respuesta a un interrogante intelectual, como sería buscar soluciones a cada problema que nos puedan plantear los clientes o usuarios del servicio que se presta, cómo mejorar el servicio, qué otros servicios se pueden ofrecer, etc.

- Proyectos para la adquisición de un aprendizaje específico o adiestramiento (lleva al educando a adquirir determinada habilidad o conocimiento motivados por el aprendizaje).

Cualquiera de estos tipos de proyectos son los que inspiran nuestra metodología que huye de una de las más tristes nociones de la educación formal que tiene, por obligación, que ocurrir dentro de las paredes del salón de clases o del taller. Las actividades reales, como su nombre lo indica proveen de verdaderas oportunidades para el aprendizaje relevante del alumnado.

V. RECURSOS DISPONIBLES Y NECESARIOS

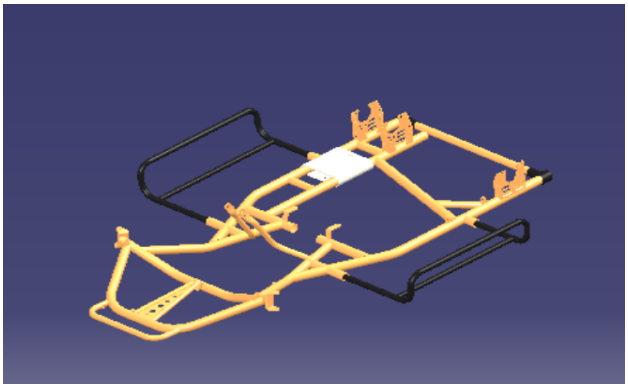
Los recursos humanos y materiales con los que se parten para afrontar este proyecto educativo vienen dados por la dotación e infraestructuras que posee el CIFP La Laguna asignadas a los ciclos formativos de la *Familia Profesional de Transporte y Mantenimiento de Vehículos*. En particular, con los espacios de las aulas-taller T1 y T4 con equipamientos propios de un taller de electromecánica y de carrocería.

Entre los recursos incialmente necesarios de adquirir se encuentran:

Chasis tubular de acero aleado Cr–Mn laminado en frío con protecciones y soportes de mecanismos y accessorios

Conjunto de mecanismos de: - dirección; incluido semiejes, articulaciones y volante; - de frenos hidráulicos; con bombas, pinzas y discos para semiejes delanteros y árbol trasero; - de llantas con ruedas para kart

Conjunto de equipo de carrozado y asiento con las protecciones y conducciones aerodinámicas en fibra de vidrio



Para la adquisición de este equipamiento se optó por adquirir un gokart usado completo pero con algunos desperfectos reparables. El objeto de esta decisión es la de ganar tiempo porque fabricar una unidad desde el principio iba a llevar demasiado tiempo y esfuerzo, tanto desde el punto de vista constructivo como económico. Al final, el coste de estos elementos sumó la cantidad aproximada de 1.500,00€

Otro conjunto de elementos necesarios de adquisición para la ejecución del presente proyecto lo constituyen:

- El propulsor eléctrico brushless de 84V, 12 kW de potencia nominal en continuo (30 kW pico) controlado por medio de centralita programable y accionado por regulador/variador a pedal

- Grupo de 7 baterías AGM de 12 V y 30 Ah

- Conjunto de elementos de control y seguridad

Para la adquisición de este grupo de elementos se recurre a la compra internacional, por medio de Internet, sumando un coste total aproximado de 6.500,00€.

Aunque el propio centro educativo tuvo la osadía de adelantar las cantidades necesarias para afrontar los gastos aludidos, después fueron reintegrados por la *Dirección General de Formación Profesional de la Consejería de Educación del Gobierno de Canarias* a través del programa de financiación de proyectos de innovación educativa.

VI. PRINCIPALES INCONVENIENTES DURANTE EL PROCESO DE DISEÑO Y EJECUCIÓN

Ajeno a la actividad estrictamente docente se han sufrido algunos inconvenientes derivados de la ubicación del centro educativo que, al tratarse de un territorio isleño, relativamente pequeño y alejado del continente, dificulta el acceso al equipamiento necesario para un proyecto de la envergadura que nos ocupa. Estas dificultades se traducen en:

- poca variedad de elementos en el mercado local

- necesidad de comprar por Internet con todo lo bueno y malo que ello supone

- sobrecoste por transporte y aranceles (en algún caso llega a suponer un aumento del 50%)

Por otro lado, existen dificultades, que podríamos tildar como estructurales por su relación con la rigidez de la función pública docente, que penaliza al profesorado al tener que realizar un sobreesfuerzo organizativo al no disponer de tiempo y de horario para reuniones de coordinación y, por supuesto, de carecer de incentivos que puedan animar a la participación. Esto se agrava al trabajar con currículos excesivamente apretados que no permiten mucho juego para la aplicación de metodologías activas e innovadoras y, como no, de disponer de poca capacidad financiera para acometer proyectos de esta índole.



VII. CONCLUSIONES

A pesar de los problemas e inconvenientes encontrados a lo largo del proceso, los objetivos generales y educativos marcados han sido alcanzados sobradamente. Por tanto, se puede concluir, en una primera aproximación, que la aplicación de la metodología de proyectos reforzada con los beneficios del trabajo colaborativo es de gran utilidad para la función docente.

Eso si, el esfuerzo y los recursos necesarios son muy superiores a las prácticas docentes convencionales, lo que hace muy difícil, o casi imposible su aplicación. Si no cambian las condiciones de trabajo para los docentes, la aplicación de este tipo de metodologías activas sólo pueden ser posibles con un alto grado de altruismo y desprendimiento del profesorado.

REFERENCIAS

[1] Willian H. Kilpatrick, "The Project Method," *Teachers College Record* 19 (September 1918): 319–334

[2] https://es.wikipedia.org/wiki/Trabajo_colaborativo

[3] http://blog.tiching.com/claves-de-la-ensenanza-por-proyectos-de-kilpatrick/

[4] https://es.wikipedia.org/wiki/William_Heart_Kilpatrick

[5] Colomina, R. y Onrubia, J. "*Interacción educativa y aprendizaje escolar: la interacción entre alumnos"*

[6] Coll, C., Palacios, J. y Marchesi, A. "*Desarrollo psicológico y educación II"* Alianza editorial, madrid 2001. (Tomo II)

[7] Mercer, N. "*La Construcción guiada del conocimiento, el habla de profesores y alumnos"* Paidós, Barcelona 1997

[8] Aduviri, R. http://websirius.iespana.es

Aportaciones al diseño y construcción de trazadores de curvas características de dispositivos fotovoltaicos

E.F. Fernández, J. Montes-Romero, J. de la Casa
Centro de Estudios Avanzados en Energía y Medio Ambiente
Grupo de Investigación IDEA, Universidad de Jaén,
Campus Lagunillas, 23071 Jaen, España
E.F. Fernández: fenandez@ujaen.es

A. Firman, M. Cáceres, L.H. Vera
GER – Grupo en Energías Renovables –
Universidad Nacional del Nordeste
Av. Libertad 5470 – 3400 Corrientes. Argentina

***Abstract*— Sin duda, el trazado de la curva característica *I-V* de cualquier dispositivo fotovoltaico es el experimento esencial que permite obtener información fidedigna sobre su estado y comportamiento. Por tanto, debe ser parte de los contenidos prácticos obligatorios en cualquier asignatura, ya sea de Grado, Máster o Doctorado que persiga formar a los estudiantes en el campo de la ingeniería de los sistemas fotovoltaicos. En esta comunicación se presenta los avances-logros de dos grupos de investigación, uno argentino y otro español, en el diseño de prototipos electrónicos o sistemas ad-hoc que permiten realizar este experimento y que, posteriormente han sido integrados en las prácticas de las asignaturas donde dictan docencia o en las investigaciones en las que están involucrados y que abordan los pormenores de esta tecnología.**

Keywords*— *Ingeniería de los sistemas fotovoltaicos; cargas electrónicas; caracterización de dispositivos fotovoltaicos, docencia en energías renovables.

I. INTRODUCCIÓN

La generación eléctrica por medio de la tecnología fotovoltaica (FV) ha sido una de las técnicas renovables que mayor éxito ha presentado durante la última década. Por ejemplo, durante el periodo 2005-2015, se registró una tasa de crecimiento anual del 27% en la inversión de este tipo de sistemas [1]. Además, durante el año 2016, 75 GWp fueron instalados en todo el planeta [2]. A finales del año 2017, se superaron los 320 GWp de potencia instalada global [3]. Actualmente, los países que lideran la potencia instalada de esta tecnología son: China, Japón, EEUU y Alemania, pero existen razones para intuir que el uso de esta tecnología, en la próxima década, se va a repartir de manera uniforme por todo el planeta, especialmente, en los países emergentes que necesitan aumentar su potencia de generación de energía eléctrica para su desarrollo.

Se considera de gran importancia el fomento y la formación de personal cualificado que lidere este mercado emergente. Para lograr este objetivo, se estima imprescindible incluir este tipo de conocimientos en las currículas dentro de estudios de ingeniería [4].

Existe una relación directa entre áreas de conocimiento como la Ingeniería Eléctrica o la Tecnología Electrónica y la tecnología fotovoltaica. La propia célula FV de 1º generación, tecnología de silicio cristalino, se basa en una unión PN. Además, gran parte del equipamiento necesario (inversores, reguladores de carga, equipos de caracterización, etc.) para el uso de dicha tecnología no son otra cosa que sistemas cuyos fundamentos son estudiados en cualquier titulación de ingeniería electrónica.

Para comprender la tecnología FV, es fundamental entender de qué manera se comporta el generador FV. El experimento que más información aporta acerca del funcionamiento de cualquier dispositivo fotovoltaico es el trazado de su curva *I-V*. Dicha curva está formada por los infinitos pares de puntos tensión-corriente a los que opera un dispositivo FV, en función de las condiciones medioambientales a las que haya estado sometido durante el experimento. A partir de este conjunto de puntos es posible obtener todos los parámetros eléctricos característicos de interés del dispositivo, así como, determinar cualquier tipo de anomalía, defecto o situación de mal funcionamiento [5]–[8].

Los grupos de investigación a los que pertenecen los autores de este artículo llevan más de una década desarrollando diferentes arquitecturas y soluciones de diseño directamente relacionadas con este experimento. Las mismas han sido utilizadas para sus trabajos de investigación e incorporadas en sus labores docentes [9]–[12]. Se presenta a continuación una revisión de los logros más destacados.

II. FUNDAMENTO TEÓRICO DEL TRAZADO DE LA CURVA *I-V*

En la Figura 1 se muestra la curva *I-V* típica de un dispositivo fotovoltaico. Esta curva característica está formada por los pares de puntos tensión corriente que se obtienen si, encontrándose el dispositivo en condiciones de operación, se varía la impedancia entre sus extremos desde cero hasta infinito. En la figura también se resaltan los puntos de mayor interés de la curva, ya que son los que proporciona el fabricante en sus hojas de características técnicas, donde se distinguen tres situaciones principales: corriente de cortocircuito (*Isc*), la tensión de circuito abierto (*Voc*) y el punto de potencia máxima (*Pm*), que se encuentra definido por la tensión (*Vm*) y la corriente (*Im*) de máxima potencia.

Además de estos valores eléctricos básicos que se obtienen directamente de la curva *I-V*, a partir de éste conjunto de puntos, se pueden obtener otros parámetros de interés, mediante modelos matemáticos [13], que permiten realizar modelos eléctricos equivalentes del funcionamiento de la célula, módulo o generador FV. Dichos parámetros serán, en el caso por ejemplo de pretender obtener un modelo teórico de cinco parámetros: la corriente fotogenerada (*Iph*), la corriente

de saturación del diodo (*Io*), el factor de idealidad del diodo (*m*), la resistencia serie (*Rs*) y la resistencia paralela (*Rsh*) [14], [15].

Todos los parámetros eléctricos obtenidos durante el trazado de la curva son dependientes de la tecnología del dispositivo y de las condiciones de operación a las que ha estado expuesto. Evidentemente, el parámetro que más influye es la irradiancia incidente en el plano, casi directamente proporcional a la corriente obtenida. En segundo orden de magnitud, la temperatura de célula, que afecta, como en cualquier dispositivo basado en semiconductores, al valor de la tensión.

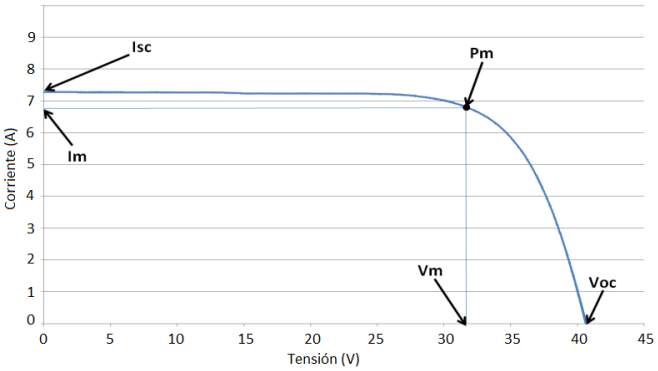


Figura 1. Curva característica *I-V* de un módulo fotovoltaico y la localización sus parámetros eléctricos básicos característicos.

Los fabricantes de módulos FV proporcionan el valor de los parámetros eléctricos básicos bajo unas condiciones ambientales específicas conocidas como Condiciones Estándar de Medida (CEM), que son definidas en la norma IEC 60891 [16] y que serán 1000 W/m² de irradiancia, 25 ºC de temperatura de célula y espectro solar AM 1.5.

Encontrar unas condiciones similares a las CEM resulta extremadamente complicado. Por este motivo, existen métodos de extrapolación a CEM [17]–[19]. También en este aspecto, existe un procedimiento normalizado para realizar esta traslación mediante el trazado de curva *I-V* en la norma IEC 60904 [20]. Estos métodos también han sido de interés para material docente de apoyo a estudiantes en materias directamente relacionadas con la energía solar fotovoltaica [21].

Para realizar el trazado de la curva característica de un módulo FV se requerirá de un equipamiento que es comúnmente accesible en cualquier laboratorio básico de electrónica. A grandes rasgos, un trazador de curvas *I-V* es un sistema electrónico capaz de producir una variación de impedancia entre cero e infinito, para de este modo, realizar un barrido en todo el rango de funcionamiento de elemento FV cuando está correctamente polarizado. Además, por los motivos expuestos anteriormente, el sistema debe registrar cuasi-simultáneamente los parámetros ambientales a los que trabaja el módulo FV, principalmente irradiancia y temperatura, en el momento del trazado de la curva. Como no siempre es posible su medida durante el trazado, se podrá medir en los instantes anterior y posterior a dicho proceso, y posteriormente comprobar que las condiciones ambientales no han variado significativamente durante ese periodo para validar el experimento.

Aunque no sea uno de los objetivos principales del presente trabajo, indicar brevemente que para la medida de irradiancia se puede recurrir a dos opciones principales. Una opción será mediante el uso de piranómetros, aunque también es posible realizar esta medida por medio de células o módulos FV de referencia [22]. Si el elemento FV de referencia fue construido con los mismos materiales que el dispositivo bajo ensayo y se dispone de manera coplanaria al mismo, responde, angular y espectralmente igual que el dispositivo a ensayo. Permitiendo obviar los cambios espectrales si estos dispositivos son calibrados bajo el espectro de referencia AM 1.5.

En cuanto a la medida de temperatura de célula indicar que, comúnmente se aproxima su valor al de la temperatura posterior del módulo FV. El dispositivo que más se utiliza es la resistencia de platino (PT100), acoplada en su parte posterior tal y como se recomienda en el anexo B de la IEC 61724-1 [23]. Se recomienda realizar la medida a cuatro hilos para evitar la caída de tensión en los conductores y mejorar la precisión.

Como es obvio, el mercado ofrece equipos comerciales que permiten el trazado de la curva *I-V*. Tales equipos ofrecen las ventajas de cualquier equipo comercial, han sido probados y caracterizados por el fabricante, pero normalmente su coste es prohibitivo para los grupos de investigación o para montar un laboratorio dedicado a la docencia. Otro inconveniente es que estos productos comerciales incluyen dispositivos medidores de irradiancia y temperatura exclusivos y difíciles de reemplazar por otros tipos en caso de necesidad. Los algoritmos de tratamiento o traslación con que cuentan son cerrados y no se puede acceder a ellos. Además, pueden no incluir información detallada de las incertezas asociadas a las medidas experimentales que ofrecen. En resumen, estos equipos, por lo general, están pensados para un uso profesional [24]–[26].

Cualquier sistema trazador de curvas *I-V*, puede dividirse en un diagrama de bloques básico como el que se muestra en la Figura 2. Se pueden distinguir tres bloques principales: bloque variador de impedancia, bloque de medida y bloque de control.

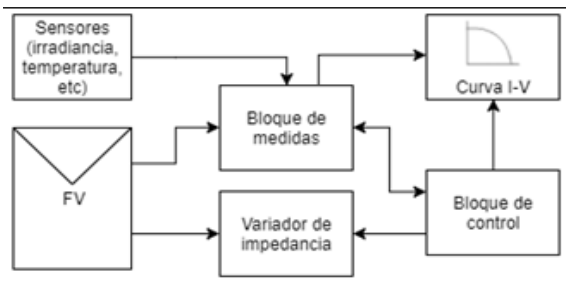


Figura 2. Diagrama de bloques básico de un trazador de curvas *I-V*.

III. BLOQUE VARIADOR DE IMPEDANCIA

El bloque variador de impedancia se encarga de realizar el barrido completo de la curva *I-V* del módulo FV variando, por tanto, su punto de operación. Para esto, se pueden distinguir distintos procedimientos que vienen resumidos en [27], y que deben de ser escogidos y diseñados en función de las características eléctricas del elemento FV a ensayo y la disponibilidad de equipo y material con el que se cuente. Los métodos posibles serán: resistencias variables, fuentes de alimentación de cuatro cuadrantes, conversores DC/DC, cargas activas y cargas capacitivas.

El método más sencillo es el uso de resistencias variables o reóstatos. La impedancia del componente se varía de forma manual, y se puede elegir el punto de operación en cada momento. El principal inconveniente de este método es la disipación de potencia. Toda la energía generada por el elemento FV debe ser disipada por la resistencia en cada instante de tiempo. Esta solución puede ser interesante para tareas docentes si se utilizan módulos de muy baja potencia, y por tanto, no se produzcan problemas de disipación de calor en la resistencia. Este método difícilmente permite la automatización del trazado

Otro método es el uso de fuentes de alimentación de cuatro cuadrantes comerciales como, por ejemplo, las que ofrece la marca comercial Kepco [28]. Este instrumento ajusta el punto de trabajo del módulo FV en una tensión determinada en cualquiera de los cuatro cuadrantes –siendo de interés especialmente el primero, aunque también tendrán utilidad el segundo y el cuarto cuadrante- y, actuando como sumidero de corriente, consumen la energía generada por el módulo FV. El objetivo de polarizar desde tensiones negativas y corrientes positivas es la de definir perfectamente los puntos *Isc* y *Voc* cuando se produce el cruce por sus respectivos ejes, ya que, por ejemplo, para la *Isc* se dificulta su obtención debido a resistencias en serie de otros elementos (cableado, interruptores, contactos, resistencia *shunt*, etc). De esta manera se consigue puntos perfectamente determinados. En principio, este método puede parecer una solución sencilla, sin embargo, este tipo de fuentes de alimentación son equipos de muy alto coste, con rangos de tensión y corriente limitados, y con un tamaño importante que dificulta su transporte, relegando su uso a laboratorio. En este aspecto poder ajustar el punto de operación del elemento FV, el uso de estos equipos para fines docentes puede ser de gran interés.

La experiencia de los grupos de investigación en este tipo de sistemas se basa en [29], donde se usó una fuente de cuatro cuadrantes para controlar el punto de trabajo del módulo FV, integrando este método en un sistema completo de caracterización en la Universidad de Málaga, tal y como se ve en la Figura 3.



Figura 3. Sistema trazador de curvas *I-V* basado en fuentes de cuatro cuadrantes instalado en la Universidad de Málaga.

Los conversores DC/DC son otra posible solución al problema del barrido de la curva *I-V*. Esos conversores tienen la capacidad de variar la impedancia dependiendo del régimen de trabajo. Esta propiedad los hace adecuados para resolver el problema propuesto. Un esquema simplificado de la etapa de potencia de este tipo de conversores se muestra en la Figura 4. La principal dificultad de este tipo de sistemas es el manejo y disipación de la energía del generador. Para poder manejar una mayor cantidad de potencia, será necesario realizar asociaciones en serie o paralelo de conversores de este tipo, lo cual es, a su vez, una ventaja al tratarse de sistemas modulares. Aun así, se requiere de estrategias especiales de diseño para evitar rizados excesivos en el perfil de la curva *I-V*.

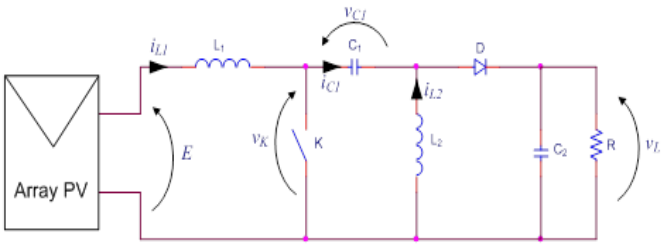


Figura 4. Esquema simplificado de la etapa de potencia mediante conversores DC/DC.

Este tipo de cargas han sido utilizados por los grupos de investigación en Proyectos Final de Carrera, y que, además, fueron publicados en [30]. Para este sistema se usaron cuatro conversores SEPIC (*Single-ended primary-inductor converter*), permitiendo el trazado de la curva *I-V* de elementos FV con unos rangos máximos de hasta 400 V de *Voc* y 10 A de *Isc*, y hasta 400 W de disipación de potencia continua. Uno de los sistemas desarrollados se puede ver en la Figura 5.

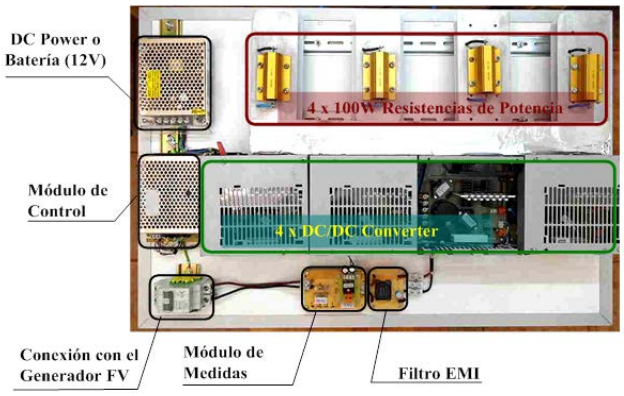


Figura 5. Sistema trazador de curvas *I-V* basado en conversores DC/DC.

Una de las propiedades tanto de las fuentes de cuatro cuadrantes, como de los conversores DC/DC es que el trazado de la curva *I-V* puede ser realizado en ambos sentidos. Es decir, se puede trazar desde el punto de *Isc* hasta el punto de *Voc*, o en el sentido contrario.

También es posible realizar la variación de impedancia a través de cargas activas. Éstas basan su funcionamiento en el trabajo de transistores en su zona activa. Para variar la impedancia, se variará la zona de trabajo desde el estado de saturación al de corte, produciendo una variación en el punto de operación del módulo FV desde circuito abierto hasta cortocircuito. Los transistores utilizados se encargan de disipar la potencia generada durante el trazado de la curva *I-V*, por lo tanto, la carga activa deberá tener la capacidad necesaria de disipación. Para ello, se podrá realizar asociaciones en paralelo con el fin de aumentar la capacidad disipativa de la carga activa. Aun así, se debe prestar especial atención para no superar la temperatura máxima permitida de estos componentes, por lo que se recomienda utilizar velocidades elevadas de barrido.

Uno de los diseños posibles con una carga activa se muestra en la Figura 6.

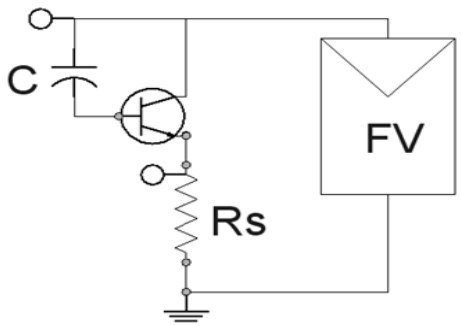


Figura 6. Esquema simplificado de una posible etapa de potencia mediante carga activa con transistor bipolar.

Como experiencia de los grupos de investigación, se han usado cargas activas basadas en transistores bipolares para realizar la variación de impedancia y disipación de potencia del elemento FV [10]. El prototipo de este sistema se puede ver en la Figura 7.

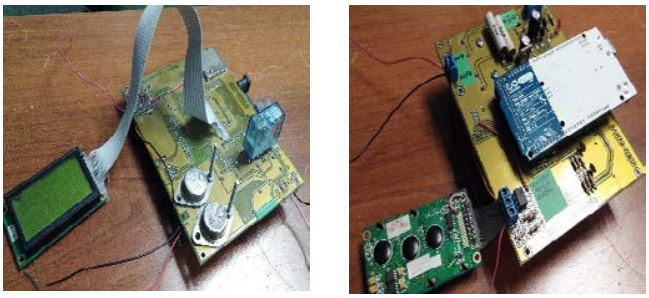


Figura 7. Sistema trazador de curvas *I-V* basado en carga activa mediante transistores bipolares instalado en la Universidad Nacional del Nordeste.

Finalmente, las cargas capacitivas serán otra forma de realizar el trazado de la curva. Su funcionamiento se basa en el transitorio de carga de un banco capacitivo. Para ello, un condensador completamente descargado comenzará su proceso de carga – iniciando con impedancia cero -, hasta que esté completamente cargado, presentando una impedancia infinita. Durante la carga, el módulo FV varía su punto de operación, barriendo la curva *I-V* por completo. Las curvas de tensión y corriente de este proceso se observan en la Figura 8, en la cual se aprecia el comportamiento descrito.

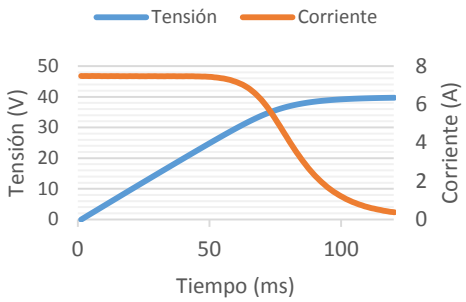


Figura 8. Forma de onda de tensión y corriente en el proceso de carga del condensador.

Las principales ventajas de este tipo de cargas son la sencillez de este método y que no existe disipación de potencia durante el trazado. La energía generada por el módulo FV es almacenada en el condensador, que luego será descargado sobre una resistencia de potencia en un proceso completamente controlado. Como principal desventaja, este proceso no permite la polarización del módulo FV en un punto determinado. Además, debido a la curva de carga del condensador, las medidas se encontrarán gradualmente más agrupadas a medida que se acercan a la *Voc*, tal como se muestra en la Figura 8.

Los grupos de investigación tienen una amplia experiencia en el desarrollo de sistemas que utilizan este procedimiento [9], [12], [31]. Debido a la simplicidad y el bajo coste de las cargas capacitivas, se han realizado varios modelos de

trazadores de curvas *I-V* basados en esta metodología a lo largo de los últimos años, y siendo actualmente el más utilizado por los grupos de investigación. En la Figura 9 se muestra como ejemplo uno de los sistemas desarrollados.

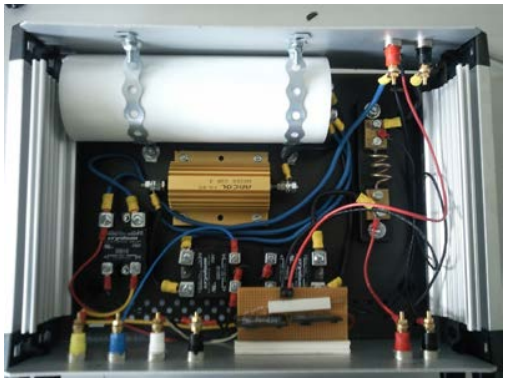


Figura 9. Sistema trazador de curvas *I-V* basado en carga capacitiva e instalac en la Universidad de Jaén.

IV. Bloque de medida

El bloque de medida se encargará de adquirir-acondicionar de manera simultánea los valores de tensión-intensidad que conforman la curva característica, así como de los parámetros ambientales relevantes a los que se ha realizado el experimento. Un esquema simplificado se puede ver en la Figura 10, donde es muestra el conexionado correcto para realizar las medidas de los pares tensión-corriente que componen la curva *I-V*.

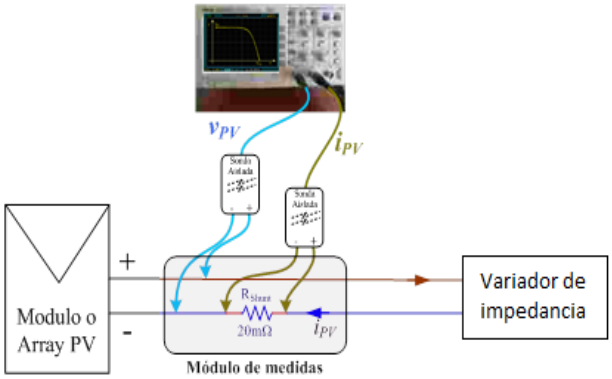


Figura 10. Esquema general del conexionado necesario para realizar la medida del generador FV.

La simultaneidad de la medida de los parámetros tensión y corriente es imprescindible por lo que es necesario asegurar que los pares medidos coinciden con la misma base temporal.

En la mayoría de las ocasiones, la medida de la corriente se realiza de forma indirecta. Para ello, se realiza la medida por medio del voltaje ofrecido por una resistencia *shunt* de valor óhmico despreciable o bien, por medio del voltaje obtenido por sensores efecto Hall, los cuales presentan la ventaja de que no requieren de una inserción física dentro del circuito eléctrico. Se recomienda el uso de resistencias tipo *shunt*, ya que nuestra experiencia indica que, para los sensores de efecto Hall, se ha reportado una deriva en la medición que resulta complicada de cuantificar. Para la medida en tensión, en la mayoría de los casos y usando equipamiento comercial, será posible realizarla de forma directa. En caso de no ser posible, se puede optar por adecuar la señal mediante divisores de tensión con un adecuado tratamiento de la impedancia de entrada del sistema de medida

La solución a priori más sencilla para realizar las mediciones es mediante el uso de osciloscopios comerciales. Con un osciloscopio de dos canales es posible realizar la medida de tensión y corriente de cualquier módulo FV de forma simultánea. Mejor solución es utilizar osciloscopios de cuatro canales aislados con los que será posible realizar la medida de tensión y corriente para la curva *I-V* y, además, de los sensores ambientales básicos necesarios mediante el mismo instrumento de medida.

Como ventaja del uso de osciloscopios para esta tarea, destaca la simplicidad de su uso, alta velocidad de muestreo y la sincronización de las medidas de corriente y tensión.

En el caso de utilizar multímetros comerciales, obligatoriamente deben poder permitir la sincronización mediante una entrada externa, de forma que se asegure que las medidas se realizan de forma simultánea. Muchos incluso, ofrecen también la posibilidad de la medida de resistencia, permitiendo la medida de sensores de temperatura resistivos de forma directa.

La mayor ventaja de los multímetros es la alta precisión de estos instrumentos. Como inconveniente, debido a la necesidad de usar dos de estos instrumentos, se aumenta el coste final del sistema de forma significativa pero el desarrollo del control de los mismos a través de programas como LabVIEW puede ser una práctica muy formativa para cualquier estudiante.

En caso de no disponer de equipamiento comercial, es posible realizar etapas electrónicas, basadas, por ejemplo, en plataformas de hardware libre. La elección de los componentes debe cumplir las condiciones expuestas anteriormente, por lo que una elaboración *ad-hoc* de un sistema a medida puede resultar algo complejo, pero fácilmente asumible por un ingeniero de la especialidad.

Evidentemente, si no se utiliza equipos de medida comerciales, el coste del sistema se reduce sustancialmente. Entre sus inconvenientes se encuentra la complejidad realizar el diseño completo con las condiciones marcadas y la dificultad de asegurar la calidad en las medidas obtenidas.

Para la tarea de medida, durante los años de experiencia de los grupos de investigación, se han utilizado osciloscopios de dos canales tanto aislados como comunes [30], [32]. También se han utilizado dos multímetros comerciales –uno para tensión y otro para corriente- para medir la curva *I-V* [11], [12], [31]. También se han diseñado y desarrollado etapas

electrónicas de medida adaptadas a las necesidades específicas de los sistemas FV.

V. BLOQUE DE CONTROL

Como se enunció en los apartados anteriores, una vez que se consigue variar la impedancia con algún tipo de carga, solo resta medir los valores de corriente y voltaje del módulo FV junto con los datos de irradiancia y temperatura de célula. Todo esto es gobernado por un bloque que denominaremos de "*control*". Este bloque puede ser un dispositivo microcontrolador, una placa de adquisición de datos con entradas y salidas digitales, generadores de funciones, interruptores manuales o automáticos, etc. Todos estos componentes están generalmente gobernados por un software de control, encargado de secuenciar el funcionamiento, dependiendo el tipo de carga empleada.

En el caso de las fuentes de cuatro cuadrantes comerciales, el control se realiza de forma directa, normalmente, mediante un PC. Al tratarse de equipos comerciales, el control variará dependiendo del fabricante, pero como característica común, estos equipos son controlables por software, por lo que para realizar el barrido *I-V*, sólo será necesario disponer de un PC y programar un software para llevar a cabo el experimento

El control para los conversores DC/DC se realiza mediante trenes de pulsos de onda cuadrada para la activación de los conversores, y trenes de pulsos de onda triangular para la alteración de la tensión de referencia, que variará la impedancia del conversor. Para esto, el método más sencillo será el uso de un generador de funciones. Estos instrumentos aseguran la tensión y frecuencia de las señales necesarias. Una solución más compleja puede ser el uso de circuitos electrónicos para generar dichas señales de control. Un posible esquema de estos sistemas se presenta en la Figura 11.

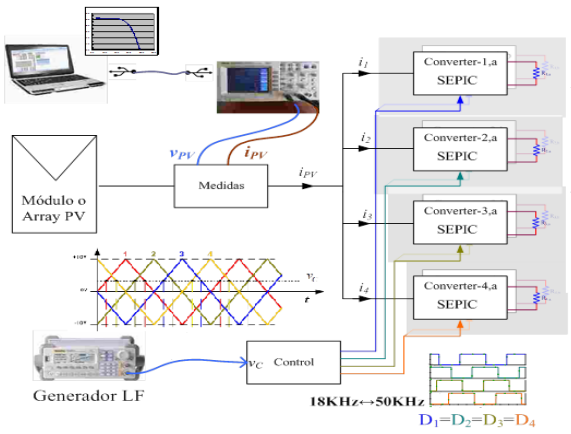


Figura 11. Esquema general del sistema de trazado de curvas *I-V* mediante conversores DC/DC.

El control de las cargas activas se realizará de forma distinta según el transistor utilizado. Si se usan transistores bipolares, se podrá realizar el control mediante la corriente en la base del transistor. Como en el caso de [10], dicho control se realizará de forma automática en función de la variable β del transistor por medio de la carga de un condensador de control. La ecuación de control que rige el tiempo de trazado de la curva *I-V* se muestra como ecuación (1). En caso de usar transistores controlados en puerta mediante tensión (MOSFET e IGBT), se podrá realizar mediante señales que varíe o bien de forma creciente o de forma decreciente como pueden ser una onda senoidal, una onda triangular, etc.

$$t = \frac{Voc^2 \cdot C \cdot \beta}{Pm} \qquad (1)$$

El control de la carga capacitiva se realiza mediante interruptores. Se destacan los procesos de carga y descarga que son controlados por dichos interruptores. Al cerrar el interruptor de carga SW1 (Figura 12), se comienza el proceso, que finalizará cuando la tensión del condensador y la *Voc* del módulo se igualen. A continuación, se abre el interruptor de carga y se cierra el de descarga SW2, con el que se disipa la energía almacenada en el condensador por la resistencia de descarga. Se debe tener en cuenta que los interruptores deberán poder soportar tanto la corriente generada por el módulo FV como la tensión máxima en estado de circuito abierto. La potencia disipada por estos interruptores será mínima, pero deben poder soportar las características mencionadas anteriormente. Para este fin se pueden usar como interruptores una gran variedad de elementos: transistores de cualquier tipo (BJT, MOSFET, IGBT), tiristores, relés de estado sólido, relés electromecánicos, etc.

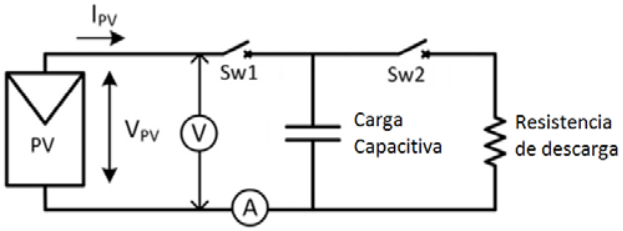


Figura 12. Esquema simplificado de una etapa de potencia mediante carga capacitiva.

El tiempo de carga del condensador se puede estimar a partir de la ecuación (2). Será necesario tener en cuenta parámetros del generador fotovoltaico como la *Voc* y la *Pm*. Además, como es lógico, dependerá de la capacidad del condensador.

$$t = \frac{Voc^2 \cdot C}{Pm} \qquad (2)$$

Entre los dispositivos de control que se han utilizado por los grupos de investigación, se pueden destacar placas Arduino, placas TIVA, placas NI-DAQ, sistemas de adquisición de datos, puertos paralelos gobernados por un PC, interruptores manuales, microcontroladores PIC, generadores de funciones, etc. Con estos se han generado las distintas señales de control necesarias para el trazado de la curva *I-V*. Como interruptores de conexión en las cargas capacitivas se

han utilizado transistores MOSFET e IGBT, tiristores y relés de estado sólido. Como software de control, cabe destacar el uso de lenguajes de programación C, Visual Studio o LabVIEW.

VI. Conclusiones

En este artículo se ha presentado de manera descriptiva los aspectos más importantes en lo que se refiere al diseño y construcción de trazadores de curvas *I-V* aplicados a tecnología fotovoltaica.

Probablemente, la conclusión más importante del presente trabajo es que resulta relativamente fácil incorporar este experimento en la curricula de cualquier asignatura relacionada con la tecnología si se dispone de un laboratorio de electrónica de nivel básico.

Además, si como es el caso de los autores, esas asignaturas dependen están integradas en una titulación de ingeniería en electrónica industrial o telecomunicación, resulta altamente formativo para los estudiantes el diseño, construcción o programación de cada uno de los bloques que forman el conjunto ya que permite afianzar y aplicar conocimientos que se han estudiado en otras materias troncales de la especialidad (Electrónica Analógica, Digital o de Potencia, Instrumentación, Sistemas de adquisición de Datos, ect). También se considera una buena opción como propuesta de Trabajo Fin de Grado o Fin de Máster por su carácter integrador de múltiples conocimientos relacionadas con la especialidad y aplicados a un caso concreto.

Se han presentado los diferentes métodos para realizar el proceso de trazado de la curva *I-V*, intentado guiar al lector y simplificando todo el proceso en tres grandes bloques: variación de impedancia, medida y control.

Sin duda, la parte más importante de los instrumentos destinados al trazado de la curva *I-V*, es la carga variable que se precisa para lograr la excursión de la impedancia requerida. Se han descrito y referenciado todos los tipos de carga que los grupos de investigación en los que trabajan los autores han diseñado y probado. Aunque se han expuesto los parámetros principales que deben ser tenidos en cuenta para el diseño y la implementación de este tipo de sistemas, se ha procurado además que la mayoría de las referencias, en las que se explica con detalle todo el proceso de diseño y construcción sean en abierto. Se recomienda al lector que pretenda implementar alguno de los diseños expuestos se dirija a las referencias propuestas.

De esta manera este artículo pretende convertirse en material de apoyo a la enseñanza de la energía solar FV, tanto a nivel de grado como de postgrado, en donde se necesiten implementar instrumentos que lleven a cabo el trazado de la curva *I-V* con fines didácticos o científicos.

Referencias

[1] Bloomberg New Energy Finance, “Global Trends in Clean Energy Investment,” 2017.

[2] SolarPower Europe, “Global market outlook for solar power 2017-2021,” 2017.

[3] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, “Photovoltaics Report,” 2017.

[4] J. De Casa, M. Fuentes, J. V Muñoz, D. L. Talavera, G. Nofuentes, and J. Aguilera, “Herramientas para la docencia de créditos prácticos en asignaturas directamente relacionadas con la energía solar fotovoltaica .,” in *TAEE 2012*, 2012, pp. 168–173.

[5] M. García, J. M. Maruri, L. Marroyo, E. Lorenzo, and M. Pérez, “Partial Shadowing, MPPT Performance and Inverter Configurations: Observations at Tracking PV Plants,” *Prog. Photovolt Res. Appl.*, vol. 15, no. April, pp. 659–676, 2008.

[6] D. Picault, B. Raison, S. Bacha, J. de la Casa, and J. Aguilera, “Forecasting photovoltaic array power production subject to mismatch losses,” *Sol. Energy*, vol. 84, no. 7, pp. 1301–1309, 2010.

[7] M. Piliougine *et al.*, “Comparative analysis of energy produced by photovoltaic modules with anti-soiling coated surface in arid climates,” *Appl. Energy*, vol. 112, pp. 626–634, 2013.

[8] A. Firman, V. Toranzos, A. Busso, L. Vera, and J. de la Casa, “Qualitative analysis of electrical mismatch losses in photovoltaic devices,” in *EUPVSEC*, 2013, pp. 3212–3215.

[9] C. Bello, V. Jimenez, V. Toranzos, A. Busso, L. H. Vera, and C. Cadena, “RELEVADOR PORTATIL DE CURVAS I-V DE PANELES FOTOVOLTAICOS COMO HERRAMIENTA DE DIAGNOSTICO IN SITU DE SISTEMAS DE GENERACION FOTOVOLTAICA,” *Av. en Energías Renov. y Medio Ambient.*, vol. 13, pp. 77–83, 2009.

[10] A. Firman, V. Toranzos, A. Busso, C. Cadena, and L. Vera, “Sistema híbrido para la caracterización eléctrica de arreglos fotovoltaicos,” *Av. en Energías Renov. y Medio Ambient.*, vol. 14, pp. 17–23, 2010.

[11] J. V. Muñoz, J. de la Casa, M. Fuentes, J. Aguilera, and J. C. Bertolín, “New portable capacitive load able to measure PV modules, PV strings and large PV generators,” in *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2011, vol. 1, pp. 4276–4280.

[12] J. Montes-Romero, M. Piliougine, J. Muñoz, E. Fernández, and J. de la Casa, “Photovoltaic Device Performance Evaluation Using an Open-Hardware System and Standard Calibrated Laboratory Instruments,” *Energies*, vol. 10, no. 11, p. 1869, 2017.

[13] A. M. Humada, M. Hojabri, S. Mekhilef, and H. M. Hamada, “Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 494–509, 2016.

[14] M. A. De Blas, J. L. Torres, E. Prieto, and A. García, “Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices,” *Renew. Energy*, vol. 25, no. 3, pp. 371–380, 2002.

[15] J. C. H. Phang, D. S. H. Chan, and J. R. Phillips, “Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters,” *Electron. Lett.*, vol. 20, no. 10, p. 406, 1984.

[16] International Electrotechnical Commission, “IEC 60891, Photovoltaic Devices. Procedures for Temperature and Irradiance Corrections to Measure I-V Characteristics,” Geneva, Switzerland, 2007.

[17] G. . Araujo and E. Sánchez, “Analytical expressions for the determination of the maximum power point and the fill factor of a solar cell,” *Sol. Cells*, vol. 5, pp. 377–386, 1982.

[18] K. Emery and C. Osterwald, “Measurement of photovoltaic device current as a function of voltage, temperature, intensity and spectrum,” *Sol. Cells*, vol. 21, no. 1–4, pp. 313–327, Jun. 1987.

[19] A. Firman, V. Toranzos, A. Busso, C. Cadena, and L. Vera, “Determinación del punto de trabajo de sistemas fotovoltaicos conectados a red: metodo simplificado de traslacion punto a punto a condiciones estandar de medida,” *Av. en Energías Renov. y Medio Ambient.*, vol. 15, pp. 1–8, 2011.

[20] International Electrotechnical Commission, “IEC 60904-1, Photovoltaic Devices, Part 1: Measurement of Photovoltaic Current–Voltage Characteristics,” Geneva, Switzerland, 2006.

[21] J. Montes-Romero, M. Torres-Ramírez, J. De La Casa, A. Firman, and M. Cáceres, “Software tool for the extrapolation to Standard Test Conditions (STC) from experimental curves of photovoltaic

modules," in *Proceedings of 2016 Technologies Applied to Electronics Teaching, TAEE 2016*, 2016.
[22] A. Firman, L. Zini, R. Sanchez, and L. Vera, "Desarrollo y calibración de dispositivos fotovoltaicos para determinar el recurso solar utilizable por sfcr," *Av. en Energías Renov. y Medio Ambient.*, vol. 18, pp. 9–17, 2014.
[23] International Electrotechnical Commission, "IEC 61724-1: Photovoltaic system performance - Part 1: Monitoring," 2017.
[24] P. C. Neuenstein J., "Los módulos y sus curvas," *Photon. La Rev. fotovoltaica*, pp. 54–71, 2009.
[25] P. Hernday, "Field Applications for I-V Curve Tracers," *SolarPro*, no. August/September, pp. 76–106, 2011.
[26] Tritec, "Operating Instructions Tri-ka," 2010.
[27] E. Duran, M. Piliougine, M. Sidrach-De-Cardona, J. Galan, and J. M. Andujar, "Different methods to obtain the I-V curve of PV modules: A review," in *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2008.
[28] Kepco Inc., "http://www.kepcopower.com/." .
[29] M. Piliougine, J. Carretero, L. Mora-Lõpez, and M. Sidrach-De-Cardona, "Experimental system for current-voltage curve measurement of photovoltaic modules under outdoor conditions," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 19, no. 5, pp. 591–602, Aug. 2011.
[30] J. C. Bertolín, M. Fuentes, J. V. Muñoz, and J. de la Casa, "Applications of DC/DC converters for obtaining characteristic curves of PV generators," in *27th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2012.
[31] J. V. Muñoz *et al.*, "Automatic monitoring system to assess the outdoor behaviour of photovoltaic modules," in *29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2014, pp. 2654–2657.
[32] G. Nofuentes, J. Aguilera, E. Álvarez, L. Hontoria, and J. de la Casa, "Estimación de la potencia máxima media en condiciones estándares de medida de un módulo fotovoltaico de silicio cristalino," in *X Simposio Peruano de Energía Solar*, 2003.

La Enseñanza de Electrónica en los Dos Primeros Cursos de los Grados de Telecomunicación: Comparativa con Universidades Españolas y Extranjeras

Ana De Andrés Rubio
Dpto. Electrónica UAH
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares
ana.denadres@uah.es

Marisol Escudero Hernanz
Dpto. Electrónica UAH
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares
marisol.escudero@uah.es

Ernesto Martín Gorostiza
Dpto. Electrónica UAH
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares
ernesto.martin@uah.es

Javier Macías Guarasa
Dpto. Electrónica UAH
Universidad de Alacalá
Alcalá de Henares
javier.maciasguarasa@uah.es

Hilario Gómez
Dpto. Teoría de la Señal y Comunicacines UAH
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares
hilario.gomez@uah.es

Germán Ros Magán
Dpto. Física y Matemáticas UAH
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares
german.ros@uah.es

Jose Manuel Arco Rodriguez
Dpto. Automática UAH
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares
josem.arco@uah.es

Sergio Lafuente Arroyo
Dpto. Teoría de la Señal y Comunicaciones UAH
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares
sergio.lafuente@uah.es

Roberto S. Costas Santos
Dpto. Física y Matemáticas UAH
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares
roberto.costas@uah.es

M. Concepción Batanero Ochaita
Dpto. Automática UAH
Universidad de Alcalá
concha.batanero@uah.es

***Abstract*— El trabajo que se presenta recoge el estudio realizado por un amplio grupo de profesores cuya carga docente recae principalmente sobre asignaturas de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alcalá. En él, se realiza un análisis de las asignaturas de electrónica que se imparten en los dos primeros cursos de los Grados de Telecomunicación de la Universidad de Alcalá y se comparan con las asignaturas con contenido de electrónica de otras universidades, tanto españolas como extranjeras. La comparación ha contemplado el contenido de dichas asignaturas, su ubicación en el plan de estudios y los créditos asignados a la materia, con el objetivo de proponer mejoras en el plan de estudios actual de la UAH. Con esto se busca una mayor compatibilidad con los títulos existentes en otras universidades del Espacio Europeo de Educación Superior. El cambio propuesto no implica reducción de contenidos ni de capacidad docente de los departamentos implicados, pero sí implica una reorganización temporal de algunas asignaturas que resulta más coherente. Con la propuesta realizada también se pretende una mayor coordinación de los contenidos de asignaturas pertenecientes a diferentes departamentos, ayudando al estudiante a relacionar conceptos. De esta forma se pretende aumentar la tasa de éxito de los estudiantes y reducir el número de abandonos de las titulaciones.**

Keywords—Docencia de Electrónica, Grado en Ingeniería, Telecomunicación.

I. Introducción

La construcción del Espacio Europeo de Educación Superior (EEES), fundamentado en la declaración de Bolonia, firmada en 1999, ha supuesto una reforma importante en los planes de estudio de las titulaciones universitarias que existían en España. El objetivo último de EEES, era facilitar la movilidad de estudiantes, profesores y titulados, entre todos los países miembros [1], y en la propia declaración no se establece como objetivo declarado, la reforma de los contenidos y materias de las titulaciones universitarias que existían hasta el momento. Sin embargo, en España la entrada en vigor de la nueva normativa, ha supuesto un cambio profundo en la estructura de las titulaciones universitarias, en los contenidos y en las metodologías con las que se imparten los nuevos grados. Todo esto debido a la búsqueda por parte de Universidades españolas de una mayor compatibilidad con los títulos existentes en otros países [2].

Desde la publicación del Real Decreto de reforma universitaria [3], han pasado unos cuantos años de implantación de los nuevos grados, y se podría hacer una valoración sobre la calidad de los nuevos planes de estudio de ingeniería de las nuevas titulaciones. En este trabajo en concreto, se analizan la ubicación y los contenidos de las asignaturas de electrónica en las titulaciones de ingeniería impartidas en la Escuela Politécnica Superior (EPS) de la Universidad de Alcalá (UAH), donde se ha producido un progresivo descenso del alumnado y una tasa de abandono alta en los grados de ingeniería relacionados con telecomunicación. Para ello, debido al carácter común de los dos primeros cursos

de los cuatro grados impartidos en la UAH, todo este análisis se restringe a estos cursos, que son por otra parte los que determinan en gran medida las tasas de éxito de los grados.

En el análisis realizado en este trabajo, se ha contado con la colaboración de un amplio grupo de profesores de diferentes departamentos de la escuela, de forma que la enseñanza de la electrónica se ha enfocado desde diferentes puntos de vista.

La metodología seguida en el trabajo ha permitido identificar y contrastar la información de los grados de diferentes universidades. En primer lugar se han tomado como referencia universidades españolas, puesto que son las que imparten estudios similares en el área, y están sujetas a la misma regulación general. No obstante, se ha ampliado el estudio a algunas universidades extranjeras, escogidas por su prestigio en el ámbito de la tecnología. La metodología utilizada y los resultados obtenidos se describen a continuación.

II. COMPARATIVA DE CRÉDITOS Y ASIGNATURAS DE ELECTRÓNICA POR UNIVERSIDADES.

Los contenidos de electrónica en los dos primeros cursos de ingeniería de telecomunicación se pueden clasificar en dos grandes grupos: las materias con contenidos de electrónica analógica y las asignaturas con contenidos de electrónica digital. Estas dos grandes áreas se concretan en diferentes asignaturas que pretenden dar una formación básica en electrónica al alumnado para que puedan abordar el estudio de asignaturas que unifican las dos materias en cursos superiores.

En la UAH, se imparten los grados de Ingeniería Telemática, Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación, Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación e Ingeniería en Electrónica de Comunicaciones, grados asociados a Telecomunicación que tienen comunes los dos primeros cursos. Al diversificarse la oferta de grados en las universidades españolas, no todos los grados son iguales ni se nombran igual aunque sean equivalentes, por lo que se ha tomado como referencia el grado en Sistemas de Telecomunicación de la UAH y se ha comparado con los grados equivalentes en otras universidades.

Las Universidades españolas contrastadas son madrileñas (Autónoma de Madrid (UAM), Carlos III de Madrid (UC3M), Politécnica de Madrid (UPM), Rey Juan Carlos (URJ)), y del resto de España (Autónoma de Barcelona (UAB), Politécnica de Cataluña (UPC), Politécnica de Valencia (UPV), Cantabria (UNICAN) y Vigo (UV)). [4-12]Pero también se ha querido contrastar con universidades extranjeras de prestigio, para ver la competencia de nuestros grados en el extranjero. Como universidades extranjeras se han seleccionado Universidades europeas que también se encuentran dentro del EEES y que son referentes en este área, como son la Universidad de Cambridge, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Escuela Politécnica Federal de Zurich (ETH), Universidad de Oporto (FEUP), Imperial College de Londres (ICL), Politécnico de Milán (POLIMI), Technical University of Munich (TUM), Universidad de Nottingham y Metropolia de Finlandia.[13-22]

En el plan de estudios de la universidad de Alcalá, las enseñanzas de electrónica se dividen en varias asignaturas. En el primer cuatrimestre de primer curso, se encuentra la primera asignatura de electrónica: Electrónica Digital. En esta asignatura se desarrollan conceptos básicos de electrónica digital, abarcando temas como el álgebra de Boole, puertas lógicas básicas, desarrollo de funciones lógicas, sistemas combinacionales y sistemas secuenciales, todos ellos abordados desde un punto de vista de circuitos discretos. La última parte de la asignatura se dedica al diseño de máquinas de estados, utilizando máquinas de Moore y Mealy. Como se verá más adelante estas materias aparecen de forma recurrente en todas las universidades consultadas, aunque con diferentes grados de profundidad.

La siguiente asignatura de electrónica que se imparte, es Electrónica Básica donde se abordan contenidos de electrónica analógica. Se comienza estudiando amplificadores operacionales y configuraciones básicas, y se desarrollan también temas dedicados a dispositivos basados en semiconductor: diodos y transistores. Esta signatura se ubica en el primer cuatrimestre de segundo curso y se imparte a la vez que Sistemas Electrónicos Digitales (SED). La continuación de Electrónica Básica es la asignatura de Electrónica de Circuitos (EC), donde se estudia la respuesta en frecuencia de las configuraciones amplificadoras vistas en la asignatura anterior, amplificación en etapas, etapas de potencia, realimentación, estabilidad y conversión A-D y D-A. En la asignatura de Sistemas Electrónicos Digitales, se usan conocimientos de electrónica digital y algunos conceptos de electrónica Básica, para estudiar sistemas digitales basados en microprocesadores. Estas cuatro asignaturas completan la formación básica de electrónica para poder abordar asignaturas que aúnan ambos conocimientos en electrónica analógica y digital, como Sistemas Electrónicos Digitales Avanzados que se da en el tercer curso del Grado de Electrónica de Comunicaciones. En total los créditos dedicados a asignaturas de electrónica en los dos primeros cursos de los grados de telecomunicación son 24 ECTS repartidos en 4 asignaturas de 6 créditos cada una.

El procedimiento para realizar una primera comparación con universidades españolas, ha consistido en consultar las guías docentes publicadas de las asignaturas que tuvieran contenido de electrónica en los dos primeros cursos de los grados más parecidos que se encontraron en las universidades consultadas. Se han comparado los contenidos de las asignaturas de la UAH, con las asignaturas de las universidades elegidas. En una primera aproximación, los contenidos son muy similares, aunque distribuidos en diferente cantidad de asignaturas y con diferentes créditos dedicados a cada asignatura. En la fig. 1 se han representado la cantidad de créditos totales que se dedican a asignaturas con contenido de electrónica en los dos primeros cursos de los grados equivalentes de Sistemas de Telecomunicación en las universidades españolas elegidas. La media de créditos dedicados a asignaturas con contenido de electrónica se establece alrededor de 24 créditos. Como puede observarse, la UAH se sitúa justo en la media, y se distinguen claramente tres universidades, UAM, UPV y UAB, que tienen créditos de electrónica por encima. La que más destaca en este aspecto es la UAB con 37,5 créditos. Se verá más adelante, que se debe a la carga alta de asignaturas de electrónica que posee el grado, a partir del segundo curso.

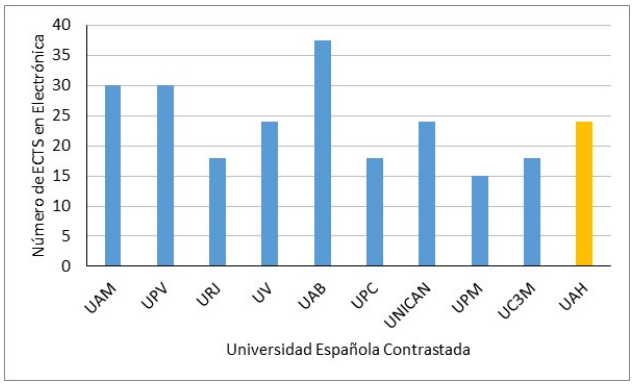


Fig. 1. Comparativa con la UAH de los créditos totales dedicados a la materia de Electrónica en los dos primeros cursos del Grado de Sistemas de Telecomunicación de las universidades españolas contrastadas.

El procedimiento para comparar los créditos de electrónica en las universidades extranjeras ha sido el mismo. En este caso la dificultad ha consistido en que la organización de los estudios en las universidades extranjeras es sustancialmente diferente a las titulaciones españolas. Normalmente los cursos se dividen en semestres, incluso en algunos casos se pueden cursar las mismas asignaturas en semestres distintos ya que se van repitiendo a lo largo del año. En muchas de las universidades, existen cursos preparatorios, como en la universidad de Lausanne, que forman parte del grado y que no tienen una equiparación en las universidades españolas, por lo que analizar los contenidos de electrónica en los dos primeros cursos ha sido un trabajo arduo. Otra dificultad añadida es que las guías docentes de las asignaturas no están tan desarrolladas como las españolas, o por lo menos en las publicaciones disponibles para el público en general.

No obstante, se ha tratado de comparar las asignaturas básicas de electrónica usando los dos primeros cursos del grado en aquellas universidades que estructuran los estudios de forma similar a España, y usando cursos preparatorios y primer semestre en aquellas que la estructura está menos clara. En la fig. 2 se ve una primera comparación de los créditos dedicados en general a asignaturas de electrónica. En esta gráfica no se han incluido el ICL ni la Universidad Metropolia de Finlandia, ya que la información sobre los créditos dedicados a cada asignatura era inexistente.

En la fig. 2, se puede observar que la media de dedicación a asignaturas con contenido de electrónica en los dos primeros cursos de las titulaciones está cerca de los 21 créditos, algo por debajo de la media española. En la gráfica se distingue claramente que mientras en la universidad de Alcalá en comparación con las universidades españolas está en la media, en el caso de compararla con universidades extranjeras, está por encima de la media.

Cabe destacar que, de los créditos analizados en estas universidades, muchos en realidad son asignaturas de prácticas. Esto es una gran diferencia con las universidades españolas, donde los créditos que se analizaron corresponden a asignaturas con contenido teórico y práctico. Por ejemplo, en la universidad politécnica de Lausanne, en los cursos de grado, se dedica en el primer curso un 40% de la enseñanza a créditos prácticos y un 42% en los dos siguientes cursos

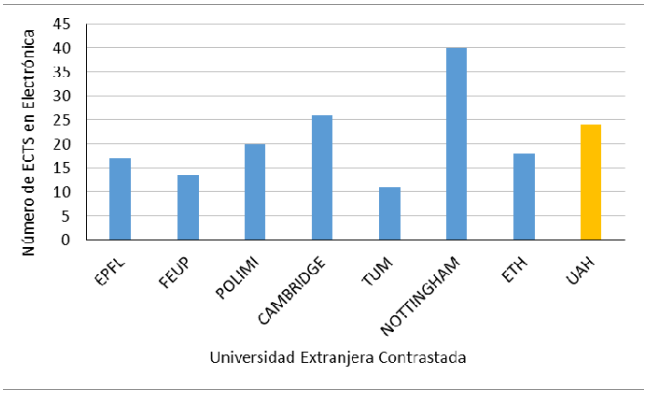


Fig 2. Comparativa con la UAH de los créditos totales dedicados a la materia de electrónica en los dos primeros cursos de los grados extranjeros similares a Sistemas de Telecomunicación de universidades extranjeras.

En cuanto a la distribución de contenidos en cada asignatura, existe una gran discrepancia en general en todas las universidades analizadas. En la universidad de Alcalá, existe una clara diferenciación entre las asignaturas de primero y segundo dedicadas a contenidos de electrónica analógica y electrónica digital. Esta distinción no es tan clara, sobre todo en las universidades extranjeras. Los contenidos del grado en general de todas las asignaturas son contenidos básicos y en muchos casos asignaturas con contenidos de electrónica que en la UAH se dan en los primeros cursos, se desplazan a cursos superiores. La comparación de la cantidad de asignaturas que se dedican en primero y segundo entre las universidades españolas puede verse en la fig. 3.

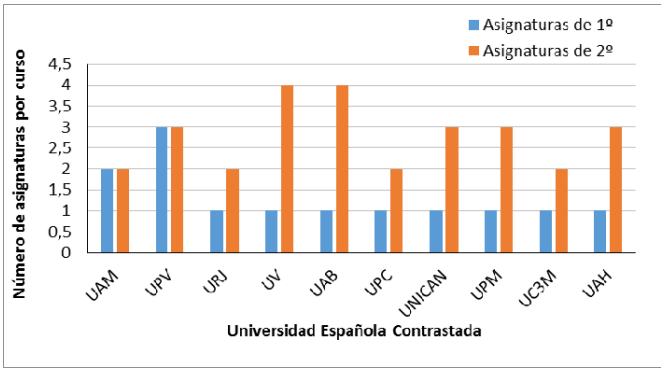


Fig 3. Dsitribución de asignaturas con contenido de electrónica por curso en las universidades españolas

Se puede observar claramente que la mayoría de las universidades mantienen una asignatura básica en el primer curso, pero el contenido se distribuye casi todo en el segundo curso.

La misma comparación con las universidades extranjeras, nos indica que la presencia de asignaturas específicamente electrónicas en los dos primeros cursos de los grados analizados es muy pobre, incluso en alguna universidad como la politécnica de Milán, no se imparte ninguna asignatura de electrónica en el primer curso. Los contenidos básicos se imparten en segundo y los contenidos más avanzados se imparten en cursos superiores. En este estudio sí se han incluido el ICL y la Metropolia, ya que la información sobre las asignaturas en los años del grado sí está disponible. Los grados analizados en estas dos universidades y el ETH, corresponden a grados más específicos de electrónica, ya que no existe un grado similar a Sistemas de Telecomunicación. En este caso se puede ver cómo en el ICL, hay un reparto mayor de asignaturas en primero que en segundo. En el ETH, también puede observarse que existe la misma cantidad de asignaturas en primero y segundo año. Sin embargo, en el Metropolia, las asignaturas de electrónica se desplazan a segundo, dejando asignaturas transversales en primero, como Inglés técnico o expresión oral y escrita. En la fig. 4 se pueden observar los resultados de esta comparación.

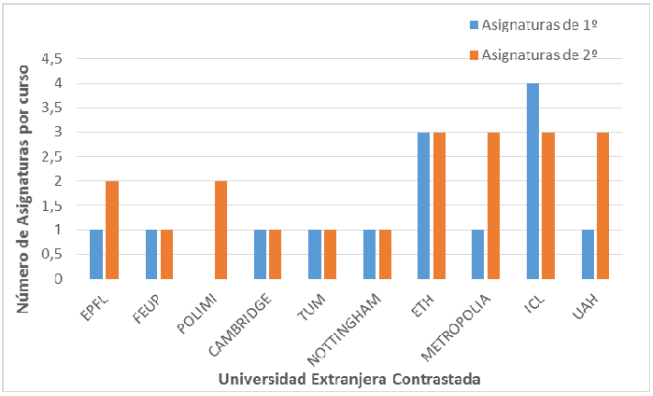


Fig 4. Dsitribución de asignaturas con contenido de electrónica por curso en las universidades extranjeras

En cualquier caso, a la vista de los datos presentados hasta ahora, la cantidad de asignaturas asignadas a electrónica en las universidades españolas en los dos primeros cursos es muy similar a la UAH, desplazándose en la mayoría de los casos a asignaturas de 2º curso. Y aunque en créditos la UAH se mantiene dentro de la media, es destacable que en algunos casos las asignaturas de otras universidades no son necesariamente de 6 créditos ECTS, como ocurre en la UAH, si no que el contenido se reparte en asignaturas de menos créditos, como la UPM o la UPV, donde hay asignaturas de 3 y 4,5 créditos ECTS. O también se concentran los contenidos en asignaturas de más créditos en segundo curso, como por ejemplo en la UAB.

En el caso de las universidades extranjeras, los grados no se organizan de la misma forma, de manera que se han buscado los grados más similares por contenidos y créditos totales. Esto hace que en algunos casos como en el ICL, el ETH, o Metropolia el grado más parecido sea claramente un grado en electrónica y telecomunicación, por lo que las asignaturas dedicadas a la electrónica son más que en el resto. Sin embargo, la media de créditos totales de electrónica en los dos primeros cursos de las universidades comparadas está ligeramente por debajo de la media en universidades extranjeras. En realidad en las universidades contrastadas, los planes de estudio son muy dispares de forma que se pueden encontrar titulaciones específicas de electrónica, a partir de estudios de master o cursos superiores como ocurre en Cambridge, TUM o Nottingham, mientras que en otras universidades como ICL, Metropolia o ETH, ya se ofertan los grados orientados desde el inicio.

A la hora de comparar las titulaciones, no sólo es importante la cantidad de créditos o asignaturas que se dedican a la materia, si no también la distribución de contenidos a la hora de abordar la enseñanza de la electrónica. Hay que tener en cuenta las necesidades de asignaturas posteriores en cada grado; por lo que a continuación se mostrarán los resultados de analizar en qué medida las asignaturas están ubicadas adecuadamente en base a la relación que tienen con otras asignaturas y la carga de trabajo que supone para los estudiantes.

III. COMPARATIVA DE DISTRIBUCIÓN DE CONTENIDOS DE ELECTRÓNICA EN LOS GRADOS DE LA UAH

La estructura de la enseñanza de electrónica se ha basado en las competencias definidas para cada materia en la normativa desarrollada a partir de la declaración de Bolonia. En comparación con las antiguas titulaciones se ha definido un escenario nuevo más flexible a la hora de diseñar las titulaciones [2]. Además, el cambio en la metodología, asumiendo nuevas técnicas pedagógicas a la hora transmitir el conocimiento, ha llevado a aumentar la carga de materias transversales en todos los grados. Esto ha hecho que la organización de las enseñanzas de electrónica, varíen de una universidad española a otra. En cuanto a las universidades extranjeras, siempre han destacado por sus métodos didácticos mucho más orientados al aprendizaje autónomo del estudiante y a las enseñanzas prácticas, aun así han ido modificando sus planes de estudio, acomodándolo a la nueva normativa.

El punto de partida de este análisis es el estudio realizado por el mismo grupo de profesores, sobre las relaciones que existen entre las asignaturas del plan de estudios [22]. En este análisis se establecieron los contenidos de cada asignatura que afectaban al resto de asignaturas de los cursos implicados, por lo que en asignaturas como EC o SED, no se contemplan las dependencias de otras asignaturas ya que son de cursos superiores. El resultado del análisis de las asignaturas de electrónica, se puede ver en la fig. 5, donde se muestra la parte específica de electrónica del proyecto. [23]

La estructura que se sigue en la UAH en las asignaturas de electrónica está directamente relacionada con la dependencia de contenidos con otras asignaturas. Sin embargo, del análisis de los planes de estudio españoles una primera consecuencia que se puede sacar es que, aunque en cuanto a contenidos, todos son muy similares, al menos en el papel, existen diferencias significativas en cuanto a la organización del temario.

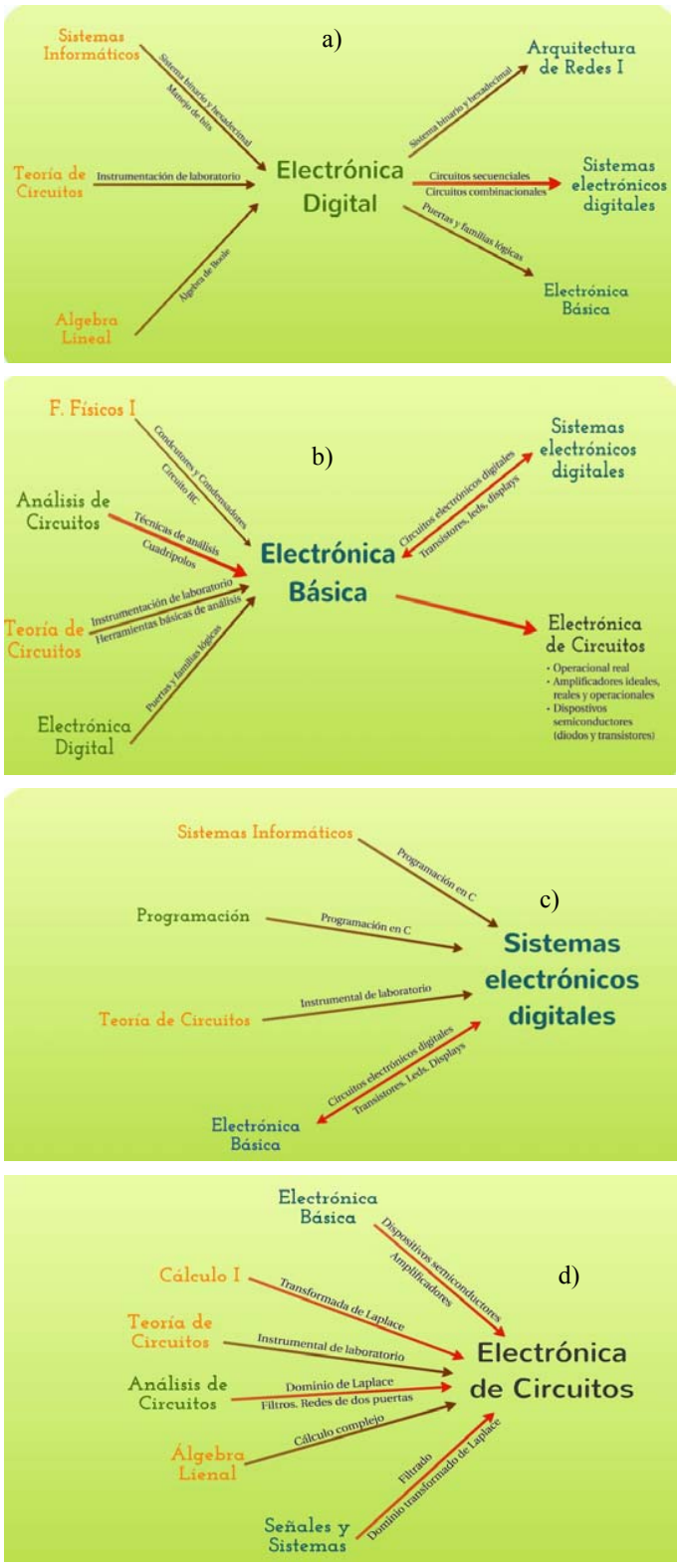


Fig 5. Interrelación entre asignaturas de electrónica en el grado de ingeniería de sistemas de Telecomunicación de UAH. a) Electrónica Digital. b) Electrónica Básica. c) Sistemas Electrónicos Digitales. d) Electrónica de Circuitos.

Es de destacar que hay varias universidades españolas que incluyen en el temario (sobre todo en los primeros cursos) asignaturas de introducción a la ingeniería o de habilidades "transversales" que permiten reducir la carga de materias más técnicas y que sirven para poner en contexto al estudiante. Como ejemplos cercanos podemos destacar:

- La universidad Carlos III de Madrid tiene las asignaturas "Técnicas de Búsqueda y uso de la Información" y "Técnicas de Expresión Oral y Escrita". Ambas de 3 ECTS en el primer cuatrimestre de primer curso.
- La Universidad Politécnica de Madrid tiene "Introducción a la Ingeniería de Telecomunicación" con 3 ECTS en el primer cuatrimestre de primer curso.
- La universidad Rey Juan Carlos tiene las asignaturas "Expresión Oral y Escrita y Búsqueda de Información" de 6 ECTS en primer cuatrimestre de primer curso y "Normativa y Deontología en Telecomunicación" también de 6 ECTS en el segundo cuatrimestre.
- Las universidades de Cantabria, UPM, UPV y Rey Juan Carlos incluyen asignaturas de inglés en los primeros cursos, tal y como demandan el 54% de nuestros estudiantes [24].

En las universidades extranjeras, la distribución de asignaturas es mucho más dispar. Especialmente difieren las universidades inglesas y la de Finlandia donde existe una gran modularidad y diversidad de asignaturas. El resto de las universidades muestran mayor uniformidad, dentro de que todas ellas tienen programas mucho más flexibles que las españolas, para la elección de asignaturas por parte de los estudiantes. Algunas particularidades interesantes que se han encontrado en este análisis se detallan a continuación:

- En general hay pocas clases magistrales y se hace más hincapié en las clases de estudio acompañado o de laboratorio.
- Hay asignaturas específicas de laboratorio. Algunas de ellas con muchos créditos asociados.
- La evaluación suele ser mediante exámenes finales y sin embargo en los casos en los que se realiza evaluación continua, no existen límites a los porcentajes de las pruebas.
- En algunos casos se introducen cursos propedéuticos o incluso se pide algún tipo de certificación en conocimientos básicos de Matemáticas o Física.
- Las materias básicas son muy similares en cuanto a temario en todas las universidades analizadas. Así Matemáticas, Física, Circuitos, Señales y Sistemas, Teoría de la Comunicación, Electrónica Analógica y Digital, Programación podrían ser equivalentes a las impartidas en la UAH con diferencias difíciles de sistematizar en cuanto a organización del contenido y a créditos asignados.
- En cuanto a los contenidos específicos de electrónica, en general los temas que se incluyen en las

asignaturas con contenido de electrónica digital son los básicos, empezando por álgebra de Boole, sistemas combinacionales y secuenciales. Se puede decir que estos contenidos tienen mayor o menor peso dependiendo de la universidad, ya que en muchos casos se tiende a incluir en asignaturas iniciales lenguajes de programación como el VHDL, y sistemas programables como FPGA's o PLD's y memorias, que reducen claramente los contenidos de dispositivos discretos.

- Prácticamente en todas las universidades, se dedica parte del temario a estudiar componentes basados en semiconductor. En casi todos los casos transistores y diodos. Lo que difiere es en qué asignaturas se imparten tales materias, que en algunos casos no es una única asignatura.

Este análisis de los contenidos de electrónica en las asignaturas de otras universidades ha reabierto un debate existente dentro de la UAH, sobre la necesidad de incluir o no con detalle los temas dedicados a dispositivos de semiconductor. Sin entrar en el detalle de todas las guías docentes consultadas, se podría decir que la presencia de estos temas es prácticamente uniforme en todas las universidades españolas, incluyéndose el estudio de diodos y transistores en todas las asignaturas de electrónica analógica. En las universidades extranjeras, al no disponer tan fácilmente de las guías docentes con el contenido de las asignaturas, es más difícil evaluar la presencia de estos temas, sin embargo, de aquellas que facilitan el contenido de las asignaturas se puede decir que el estudio de dispositivos semiconductores aparecen siempre, y en algunos casos como en el ETH, existe una asignatura específica para el tema, "semiconductor devices", ubicada en segundo cuatrimestre del segundo curso.

De este análisis se deduce que, en cuanto a contenidos, la UAH está en la línea del resto de universidades españolas, y éstas a su vez difieren de las extranjeras donde los créditos de electrónica se distribuyen hacia cursos superiores y de especialización. Por otro lado, apoyados en el informe completo del trabajo realizado del análisis de los grados en la EPS de la UAH, donde se han analizado además la problemática actual del abandono de los estudios y sus posibles causas, se plantea una mejora del plan de estudios que afecta directamente a las asignaturas de electrónica de los dos primeros cursos.

IV. PROPUESTA DE CAMBIO DE PLAN DE ESTUDIOS EN LA UAH

Uno de los problemas planteados que impulsaron este estudio, se refiere al exceso de contenidos y carga de trabajo para los estudiantes en los cursos inferiores de la titulación. Hoy en día, es prioritario dotar al estudiante de las herramientas y la autonomía necesarias para su futuro desarrollo laboral por encima de una carga muy alta de contenidos. En las encuestas realizadas los estudiantes perciben que los temarios son excesivos (20%) o con una amplitud muy grande (43%), si bien un 35% indica que es normal. En similares valores se mueve su percepción acerca de la carga de trabajo (26% excesiva, 47% grande, 27% aceptable) [24]. Como se comentó anteriormente, en otras universidades hay algunas asignaturas de contenidos transversales y de menos créditos, que suponen una descarga de contenidos técnicos en los primeros cursos. Pero la percepción de un exceso de carga de trabajo se debe también a los métodos de evaluación continua. En la universidad de Alcalá se han implantado formas de evaluación que exigen al estudiante unas entregas de trabajos y prácticas continuas y con un peso en la nota final, superior al que tendría un examen final. Al comparar los métodos de evaluación con otras universidades, se puede encontrar que en algunos casos el examen final tiene un peso al menos del 60%, lo que descarga de trabajo continuo al estudiante durante el cuatrimestre.

En el estudio realizado sobre la interrelación entre asignaturas, resultó evidente que existen contenidos impartidos en diversas asignaturas que no tienen conexión con otras posteriores y no son indispensables en el desarrollo de la mismas [22]. Otros contenidos podrían haber quedado obsoletos o explicarse con excesiva profundidad. En la comparativa con otras universidades además ha quedado patente que contenidos que se creen esenciales no siempre lo son en los primeros cursos.

En concreto en la asignatura de Sistemas Electrónicos Digitales que en la UAH se sitúa en el primer trimestre de segundo curso, los estudiantes encuentran una dificultad añadida por necesitar conocimientos que se imparten en la asignatura de Electrónica Básica que se desarrolla de forma simultánea en el primer cuatrimestre. Por tanto, parece quizá que su ubicación no es la más adecuada en el Plan de Estudios actual, más si se tiene en cuenta que sus contenidos no son necesarios en ninguna asignatura del 2º cuatrimestre de 2º curso como puede verse en la fig 5.c.

Un problema añadido al abordar los estudios de ingeniería en la UAH es la carencia que presentan los estudiantes en materias básicas como son física y matemáticas, y que son absolutamente imprescindibles para esta rama del conocimiento. En la comparación con otras universidades extranjeras, se ha podido observar que en muchos casos, las titulaciones ofertadas de ingeniería tienen un primer curso con asignaturas básicas, y un alto grado de contenidos de física y matemáticas como por ejemplo en EPFL.

Otro dato a destacar es que, en la mayoría de las universidades extranjeras consultadas, la carga práctica es bastante mayor siendo habitual que existan asignaturas de laboratorio específicas que integren el conocimiento adquirido en diversas materias. Esto supone una ventaja para el estudiante, ya que el aprendizaje de las competencias prácticas se unifica y tiene una continuidad en el tiempo que en el caso de las asignaturas de la UAH no ocurre. En el plan de estudios actual, cada asignatura dedica una serie de sesiones al laboratorio, y se piden a los estudiantes memorias o trabajos en cada una de ellas. Esto aumenta su carga de trabajo y además, siendo muchos conceptos comunes, complementarios e instrumentación semejante, no les facilita el aprendizaje, pues tienden a parcelar cada asignatura. También resulta una carencia muy significativa el hecho de que no existan más prácticas dedicadas a simulaciones, algo común en el resto de escuelas en España.

Con los análisis previos realizados, tanto del plan de estudios y su comparación con otras universidades, como la problemática y perfil del alumnado de la UAH, se propone un cambio de ubicación y contenidos de asignaturas concretas del plan actual. Las asignaturas afectadas de electrónica son todas las que se imparten en los dos primeros cursos de la titulación. En la tabla I, se muestra el plan de estudios propuesto, que a nuestro parecer mejoraría el rendimiento en los estudiantes en los dos primeros cursos

TABLA I. PROPUESTA DE PLAN DE ESTUDIOS PARA LOS GRADOS DE TELECOMUNICACIÓN DE LA UAH.

Curso/Trimestre	Asignatura
1º/1C 30 ECTS	7.5 ECTS Cálculo I
	6 ECTS Álgebra lineal
	6 ECTS Sistemas informáticos
	4.5 ECTS Teoría de circuitos
	6 ECTS Economía de la empresa
1º/2C 30 ECTS	6 ECTS Cálculo II
	6 ECTS Fundamentos físicos I
	6 ECTS Programación
	4.5 ECTS Análisis de circuitos
	4.5 ECTS Electrónica digital
	3 ECTS Laboratorio I
2º/1C 30 ECTS	6 ECTS Estadística
	4.5 ECTS Fundamentos físicos II
	6 ECTS Señales y sistemas
	4.5 ECTS Electrónica básica
	6 ECTS Arquitectura de redes I
	3 ECTS Laboratorio II
2º/2C 30 ECTS	6 ECTS Teoría de la comunicación
	6 ECTS Electrónica de circuitos
	6 ECTS Sistemas electrónicos digitales
	6 ECTS Arquitectura de redes II
	6 ECTS Propagación de ondas

En primer lugar se propone la creación de dos asignaturas específicas de laboratorio transversal: "Laboratorio I" y "Laboratorio II". En estas asignaturas se abordan de manera multi e interdisciplinar los conceptos estudiados esencialmente en las asignaturas de las materias de Circuitos y Electrónica. El cambio afectaría a los contenidos prácticos de Electrónica Básica, Electrónica Digital, Teoría y Análisis de circuitos. Esto lleva a una reducción de carga en estas asignaturas, que quedarían como asignaturas teóricas, pero no afectan a la carga docente de los respectivos departamentos, ya que las nuevas asignaturas están vinculadas a las materias mencionadas. Por otro lado, al ser asignaturas prácticas independientes, puede ser más eficaz y eficiente que el modelo actual donde cada asignatura tiene su propio laboratorio, ya que permitiría una visión más integradora de los conocimientos adquiridos en el resto de asignaturas sin restar tiempo a éstas a la hora de explicar y aplicar sus propios contenidos.

En cuanto a la asignatura de Sistemas Electrónicos Digitales, que integra conocimientos adquiridos en asignaturas anteriores de programación y electrónica, pero que se imparte de forma simultánea a Electrónica Básica, con los problemas que se han comentado antes, se propone desplazarla al segundo cuatrimestre del segundo curso.

Como puede verse en la tabla I, los laboratorios I y II propuestos se ubican en el segundo trimestre del primer curso y el primer trimestre del segundo curso respectivamente, por lo que son consecutivos y simultáneos a las asignaturas implicadas.

En una primera aproximación sin ser exhaustivos, se ha hecho una programación preliminar de los contenidos de estos laboratorios. En la tabla II se especifican las prácticas propuestas para el laboratorio I. En éste se incluirían los contenidos prácticos de las asignaturas de Teoría de Circuitos y Electrónica Digital.

TABLA II. PROPUESTA DE PRÁCTICAS PARA LA ASIGNATURA LABORATORIO I

LABORATORIO I. 3 ECTS	
PRÁCTICAS	TEMARIO
Práctica 1	Introducción al laboratorio. Identificación de componentes y montaje en placa Board.
Práctica 2	Montaje y medida de circuitos en corriente continua. Fuente de alimentación y polímetro.
Práctica 3	Generador de señales y osciloscopio. Sincronismo y medidas básicas. Medidas de tensión y corriente en alterna. Valor eficaz.
Práctica 4	Errores en medidas. Importancia de las masas y los anchos de banda de los instrumentos.
Práctica 5	Medidas de tensión con el osciloscopio. Tensión continua, alterna y suma de ambas. Medida de la carga y descarga del condensador.
Práctica 6	Medidas de desfase e impedancias con el osciloscopio. Comportamiento en frecuencia de los distintos componentes.
Práctica 7	Montaje y medidas en circuitos con puertas digitales. Alimentación, hojas de características y conexión de los mismos.
Práctica 8	Diseño de un sistema combinacional con elementos discretos.
Práctica 9	Diseño de un sistema combinacional con FPGA's.
Práctica 10	Diseño de un sistema secuencial con elementos discretos.
Práctica 11	Diseño de un sistema secuencial con FPGA's.

Como puede verse, la asignatura "Laboratorio I" estaría dedicado al conocimiento básico de la instrumentación de laboratorio, placas de montaje, fuente de alimentación, generador de funciones y osciloscopio. Una vez trabajados esos contenidos se pasaría a su aplicación en prácticas dedicadas a la Electrónica Digital tanto de montaje como de programación de FPGA's. Este laboratorio, en principio, constará de 11 prácticas divididas por igual entre los departamentos implicados.

En la segunda asignatura de laboratorio se incluyen contenidos de simulación, con herramientas como Matlab o PSPICE, Estas herramientas creemos que son necesarias porque tanto en las materias de Teoría de la Señal y Comunicaciones como en Electrónica, la simulación es muy útil en el diseño y la implementación de sistemas. A día de hoy en la asignatura de Señales y Sistemas no hay cabida para el laboratorio y, sin embargo, en Teoría de la Comunicación sí que sería muy útil, sobre todo la utilización de Matlab. En la tabla III se especifican las prácticas propuestas para el laboratorio II.

TABLA III. PROPUESTA DE PRÁCTICAS PARA LA ASIGNATURA LABORATORIO II

LABORATORIO II. 3 ECTS	
PRÁCTICAS	TEMARIO
Práctica 1	Introducción a Matlab. Conceptos básicos y funciones básicas de programación.
Práctica 2	Representación básica de funciones. Plot y sus derivados.
Práctica 3	Transformaciones básicas de la variable independiente. Realización y visualización.
Práctica 4	Funciones para trabajar con sistemas de tiempo continuo. Diagramas de polos y ceros. Representación de la respuesta en frecuencia.
Práctica 5	Filtrado de tiempo continuo. Distorsión de amplitud y fase.
Práctica 6	Funciones para trabajar con sistemas de tiempo discreto. Diagramas de polos y ceros. Representación de la respuesta en frecuencia.
Práctica 7	El muestreo. Efectos del muestreo y su recuperación en señales. Audio e imagen.
Práctica 8	Introducción a la simulación con PSpice.
Práctica 9	Circuitos con amplificadores operacionales.
Práctica 10	Aplicaciones con diodos.
Práctica 11	Circuitos con transistores.
Práctica 12	Aplicaciones no lineales.

En este laboratorio se proponen simulaciones con Matlab de conocimientos básicos de Señales y Sistemas, para afianzar el aprendizaje, y como base para asignaturas posteriores como Teoría de la Comunicación, Tratamiento Digital de Señales o Potencia. La herramienta que se usaría en Electrónica para simulación, como apoyo a los montajes prácticos, son herramientas del tipo PSPICE, útiles para comprobar de manera "práctica" los conocimientos teóricos adquiridos. La simulación de los montajes prácticos que realizan los estudiantes en el laboratorio es un método muy útil para reforzar la adquisición de competencias.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se han analizado los planes de estudio de los grados de telecomunicación de la UAH, y se han comparado con los planes desarrollados en otras universidades españolas y extranjeras. Se ha puesto especial interés en las materias de electrónica que se imparten, estudiando el número de créditos totales y cantidad de asignaturas que se dedican a esta temática en los dos primeros cursos de los grados.

Como consecuencia de este análisis y a la vista de los resultados de la comparativa, se ha propuesto un cambio en el plan de estudios para mejorar el rendimiento de los estudiantes y disminuir la tasa de abandono. Se ha buscado también que los cambios estén en consonancia con otras universidades del EEES. Por ello, se proponen dos nuevas asignaturas de laboratorio de carácter transversal, que aúnan conocimientos de asignaturas de Circuitos y Electrónica donde se desarrollarán las competencias prácticas de ambas sin reducir contenidos. También se ha propuesto desplazar la asignatura de Sistemas Electrónicos Digitales al segundo cuatrimestre del segundo curso, dando mayor continuidad secuencial al temario actual.

Con estas propuestas los primeros cursos de las titulaciones asociadas a Telecomunicación en la UAH tendrían una estructura más acorde con las universidades europeas, y se podría contribuir a mejorar la tasa de éxito de los estudiantes en los dos primeros cursos del grado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren agradecer a la Universidad de Alcalá su apoyo por la concesión de Proyectos de Innovación Docente durante los 5 últimos cursos y por el Plan de Formación del Profesorado que sirve de estímulo a estas iniciativas. También agradecer el apoyo de María Teresa Iruela, miembro de la Oficina de Estadística de la UAH.

REFERENCIAS

[1] Portal Espacio Europeo de Educación Superior www.eees.es./es/eees.

[2] J. Arriaga, J. Blanco, P. Lobo, A. M. Groba, J.M. López, J. Hernández, C. Sanz, J. Corredor y A. Campeño. "La Formación en Electrónica en los Nuevos Grados Relacionados con la Ingeniería de Telecomunicación en España". IEEE- RITA, Vol 6, Num. 1, Feb 2011, pp. 31-39.

[3] Ley orgánica 11/1983, de 25 de agosto, de Reforma Universitaria,. Boletín Oficial del Estado, BOE número 209 de 1/9/1983.

[4] http://www.uam.es/EPS/IngenieriaTecnologiasYServComunicacion/1242661632555.htm?language=es&nodepath=Grado%20en%20Ingenier%C3%ADa%20de%20Tecnolog%C3%ADas%20y%20Servicios%20de%20Telecomunicaci%C3%B3n%20(EUR-ACE%C2%AE). [último acceso Diciembre 2017]

[5] https://www.uc3m.es/ss/Satellite/Grado/es/Detalle/Estudio_C/1371212345976/1371212987094/Grado_en_Ingenieria_en_Tecnologias_de_Telecomunicacion. [último acceso Diciembre 2017]

[6] http://www.etsit.upm.es/estudios/grado-en-ingenieria-de-tecnologias-y-servicios-de-telecomunicacion.html. [último acceso Diciembre 2017]

[7] http://www.urjc.es/estudios/grado/636-ingenieria-en-sistemas-de-la-telecomunicacion. [último acceso Diciembre 2017]

[8] http://www.uab.cat/web/estudiar/listado-de-grados/informacion-general/ingenieria-de-sistemas-de-telecomunicacion-1216708258897.html?param1=1231918843232 [último acceso Diciembre 2017]

[9] https://www.upc.edu/es/grados/ingenieria-de-sistemas-de-telecomunicacion-castelldefels-eetac. [último acceso Diciembre 2017]

[10] http://www.upv.es/titulaciones/GITTEL/indexc.html. [último acceso Diciembre 2017]

[11] http://web.unican.es/estudios/detalle-estudio?p=99&a=2017. [último acceso Diciembre 2017]

[12] https://secretaria.uvigo.gal/docnet-nuevo/guia_docent/index.php?centre=305&ensenyament=V05G300V01&idioma=gal&any_academic=2014_15 [último acceso Diciembre 2017]

[13] https://bachelor.epfl.ch/electrical-engineering. [último acceso Diciembre 2017]

[14] https://www.ee.ethz.ch/studies/bachelor.html [último acceso Diciembre 2017]

[15] https://sigarra.up.pt/feup/en/cur_geral.cur_planos_estudos_view?pv_plano_id=2639&pv_ano_lectivo=2014&pv_tipo_cur_sigla=MI&pv_origem=CUR#div_id_284884 [último acceso Diciembre 2017]

[16] http://www.imperial.ac.uk/study/ug/courses/electrical-engineering-department/. [último acceso Diciembre 2017]

[17] http://opinto-opas-ops.metropolia.fi/index.php/en/88095/en/70338. [último acceso Diciembre 2017]

[18] https://www.polimi.it/en/programmes/high-level-training-courses/honours-programme-scientific-research-in-information-technology-esr-it/ [último acceso Diciembre 2017]

[19] http://www.ei.tum.de/en/degree/bachelor-ei-bsei/. [último acceso Diciembre 2017]

[20] https://www.undergraduate.study.cam.ac.uk/courses/engineering [último acceso Diciembre 2017]

[21] https://www.nottingham.ac.uk/ugstudy/courses/electricalandelectronicengineering/electricalandelectronicengineering.aspx [último acceso Diciembre 2017]

[22] http://prezi.com/o0-ic0zhs2t8/grados-de-ingenieria-de-teleco/#.

[23] G. Ros, H. Gómez, J. Macias, S. Lafuente et al. ” Interdisciplinariedad e integración del conocimiento de las competencias básicas en los Grados de Ingeniería de Telecomunicación” . IX Congreso Iberoamericano de docencia Universitaria. Aprendizaje-servicio, desarrollo y comunidades profesionales de aprendizaje en educación superior. Vol II, pp 412-417. (2016)

[24] G. Ros, H. Gómez, E. Martín, J. Macías et al. “utilización de herramientas TIC de encuestas para generar propuestas de mejora en titulaciones universitarias. VII Congreso Internacional sobre aplicación de Tecnologías de la Información y Comunicaciones Avanzadas (ATICA 2016). Tecnología y Accesibilidad Vol. 2, pp 601-607.

Creación de Entornos Personales de Aprendizaje en la práctica docente con alumnos universitarios

Juan D. Aguilar-Peña, C. Rus-Casas, D. Eliche-Quesada, M. la Rubia-García.
Escuela Politécnica Superior de Jaén.
Universidad de Jaén. Jaén (España)
jaguilar,crus,dliche,mdrubia@ujaen.es

D.Alvarez-Jimenez
Conecta13, Educación y Desarrollo Profesional S.L.
Spin-off de la Universidad de Granada
Granada (España)
david.alvarez@e-aprendizaje.es

Abstract— **En esta comunicación presentamos el trabajo que se lleva a cabo sobre el tema de "Integración de Entornos y Redes Personales de Aprendizaje como mejora de la docencia universitaria en ingeniería", dentro del programa de implantación de buenas prácticas en estudios universitarios, que se está realizando en la universidad de Jaén, y en concreto con los alumnos del Grado de Ingeniería Electrónica Industrial. Se plantean como objetivos el empleo de nuevas herramientas virtuales de enseñanza-aprendizaje dirigidas al trabajo colaborativo, generar conocimiento de forma colectiva y estimular al alumnado en la construcción de su Entorno Personal de Aprendizaje, así como una aproximación al concepto de "Curación de Contenidos", estrategias y herramientas utilizadas.**

Keywords- Entorno Personal de Aprendizaje; PLE; aprendizajes informales; innovación docente; curación de contenidos; enseñanza superior

I. INTRODUCCIÓN

La incorporación al EEES supone, entre otras cuestiones, un cambio profundo en las prácticas docentes del profesorado. El aumento de metodologías centradas en el trabajo activo y continuado del estudiante implica la adquisición por parte del profesor de nuevas competencias, a las que no estaba acostumbrado, y la necesidad de poderlas asumir con cierto dominio y eficacia.

Estas competencias se pueden centrar en tres grandes ámbitos: competencias metodológicas para facilitar el aprendizaje autónomo y colaborativo del estudiante, competencias vinculadas a la programación y coordinación, y competencias de dominio de las tecnologías de la información y de la comunicación (TIC)[1].

Las TIC favorecen la eliminación de la barrera espacio-temporal, incorporándose a la educación presencial, semi-presencial y virtual; donde los roles de docente y estudiante cambian [2]. Usar las TIC y las plataformas virtuales de aprendizaje en las universidades ha supuesto un cambio positivo en la manera de ejercer la docencia, que supone modificar los entornos en los que aprendemos, las fuentes de información y las relaciones personales y experiencias [3,4].

Una de las competencias que deben adquirir nuestros estudiantes es la de "aprender a aprender". Esta capacidad para el aprendizaje continuo y autónomo va a depender de la adquisición de habilidades relacionadas con la búsqueda y tratamiento de la información. Buscar en Internet se ha convertido en una actividad cada vez más compleja; la cantidad de información se multiplica día a día. En este sentido nuestras universidades crean cursos dirigidos a todos los estamentos de la comunidad universitaria, que ayuda a buscar de una manera sistemática en la Red [5], y aparecen nuevos "oficios" como el "curador de contenidos", relacionado con la selección de información [6].

La mayoría de nuestros estudiantes, son usuarios habituales de redes sociales, buscadores, visualizan vídeos, generando un perfil de usuario básicamente de tipo consumidor: consumen información y se comunican con sus amigos, pero apenas producen contenidos de calidad.

Con respecto al alumnado, se han incorporado las llamadas "competencias transversales", de las cuales las que más se trabajan con los entornos personales de aprendizaje, motivo de este trabajo que se comentará más adelante son :

- Capacidad de aprender y adquirir nuevos conocimientos y habilidades.
- Conocimientos y habilidades en TIC.
- Capacidad para trabajar en equipo.
- Capacidad de organizar, planificar, gestionar y coordinar.
- Capacidad para ser autónomos/as y tener iniciativa.

Este sistema ha demandado del profesorado una formación que enseñe a aprender, y exigido de los estudiantes una mayor responsabilidad en su propia educación. En suma, ha favorecido la incorporación de metodologías activas y de sistemas de evaluación más completos [7].

En este sentido, profesores de la Escuela Politécnica Superior de Jaén, 2 de Ingeniería Electrónica Industrial, pertenecientes al área de Tecnología Electrónica y dos profesoras de Ingeniería Mecánica, del área de Ciencias de Materiales e Ingeniería Metalúrgica, una profesora pedagoga del área de Didáctica y Organización Escolar, junto a un experto acerca del concepto y las posibilidades de la utilización

de Entornos Personales de Aprendizaje (PLE), están participando en un proyecto de innovación docente que trata de promover buenas prácticas en la Universidad de Jaén, titulado "Integración de Entornos y Redes Personales de Aprendizaje como Mejora de la Docencia Universitaria en Ingeniería"[8,9].

Durante este curso académico 2017-18 se está inmerso en un proceso de implantación; habiéndose realizado toda la primera fase del mismo en la que el profesorado se implica en el conocimiento de estos entornos, como llevarlos a la práctica en el aula y conoce las distintas herramientas que se pueden y se van a utilizar. El proceso seguido es lo que trataremos de presentar en esta comunicación, dejando la descripción de la evolución de la implantación con los alumnos a otra comunicación titulada "Experiencia en la construcción de un entorno personal de aprendizaje para la asignatura sistemas de adquisición de datos", presentada en este mismo congreso. Se plantean como objetivos, el empleo de nuevas herramientas virtuales de enseñanza-aprendizaje de la Web dirigidas al trabajo colaborativo, generar conocimiento de manera colectiva y estimular en el alumnado las habilidades tanto técnicas como sociales. Al mismo tiempo, con el uso de estas herramientas se pretende que los estudiantes adquieran competencias genéricas tales como: aprendizaje autónomo y pensamiento crítico.

La primera fase, relacionada con el profesorado ha terminado en este primer cuatrimestre del curso y como se ha comentado en el párrafo anterior, se está terminando la segunda fase con alumnos de asignaturas del Grado Ingeniería Electrónica Industrial.

Con la presentación de esta comunicación pretendemos dar a conocer cuál ha sido el proceso que se ha seguido para llevar a cabo este trabajo y las fases en las que se ha dividido, junto con lo que se espera obtener al final de la implantación del mismo.

La comunicación se estructura como sigue: en la sección I realizamos una introducción al trabajo y a la incorporación de las TIC en la educación superior, en la sección II se realiza una introducción al concepto de "Entorno Personal de Aprendizaje" y a la "Curación de Contenidos", posteriormente en la sección III se realiza una descripción del proyecto junto con los objetivos que se platean, en el apartado IV describimos la metodología y fases programadas en este trabajo y se describen las herramientas utilizadas, para finalizar en la sección V con la descripción de unos breves resultados obtenidos en esta primera fase

II. Entorno Personal de Aprendizaje (PLE)

El concepto de Entorno Personal de Aprendizaje (PLE), ya aparecía en el informe Horizon Report 2011 [10] como una de las tecnologías educativas de impacto para los próximos años. Desde entonces ha evolucionado hasta un concepto con mayor énfasis en lo pedagógico que en lo tecnológico, que permite el diseño de la formación alrededor de competencias clave como son la competencia de aprender a aprender y la competencia digital [11].

Autores como Adell y Castañeda [12,13], consideran el PLE como: "El uso de tecnologías para el aprendizaje, como un conjunto de herramientas, fuentes de información, conexiones y actividades que cada persona utiliza de forma asidua para aprender". El PLE se conforma en torno a aquellas herramientas que nos permiten tres procesos cognitivos básicos: leer, reflexionar y compartir [14].

Ruiz-Palmero et al. [15], llegan a la conclusión de que los estudiantes no utilizan de forma correcta los medios disponibles y además no asocian el empleo de los PLE con una finalidad académica.

En este sentido el concepto "Content curation" (CC) o curación de contenidos es una estrategia que consiste en realizar una búsqueda, recopilación, filtración y selección de la información más relevante que encontramos en Internet (redes sociales, blogs, páginas webs, etc.), para difundirla más adelante entre nuestra audiencia. En la figura 1 se puede ver la referencia a un video realizado por uno de los miembros expertos del grupo de trabajo sobre este tema dentro de los MOOC de Educalab [16].



Figura1.- Content Curation. Ideas Clave. David Álvarez
https://www.youtube.com/watch?v=MXTTDLvt7Bw&t=133s

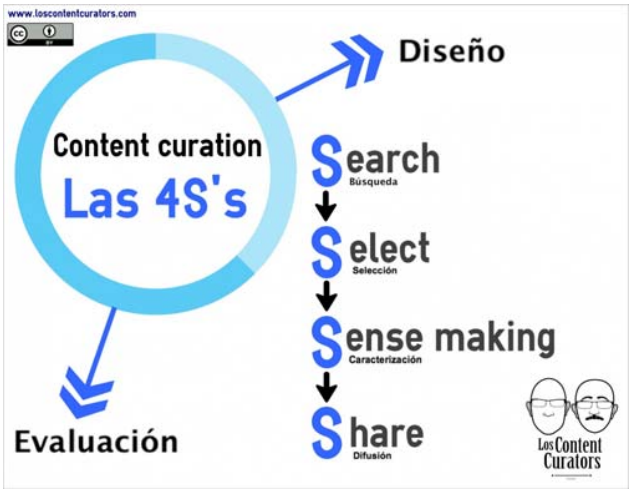


Figura 2.- las 4S's de la content curation. Javier Leiva-Aguilera y Javier Guallar [http://www.loscontentcurators.com/las-4ss-de-la-content-curation/].

Podemos decir que el ´content curator´ es aquel profesional que investiga y recopila la información que existe a diario en Internet y selecciona el contenido más relevante de su temática.

El modelo de las 4S´s de Javier Guallar y Javier Leyva explica de una forma visual y sencilla la labor del content curator: Search (búsqueda de información), Select (selección), Sense Making (Caracterización) y Share (difusión de la información seleccionada y caracterizada) (Figura 2) [6,17].

III. Objetivos

En este trabajo se trata en primer lugar de fomentar la participación entre docentes de distintas áreas de conocimiento; formando al profesorado mediante un trabajo colaborativo que nos facilite las tareas de aprender, reflexionar y experimentar con la aplicación de herramientas y metodologías novedosas. Dentro del grupo de trabajo, se analizará y profundizará en el concepto del PLE y aprendizaje informal con la ayuda de expertos y de material adecuado, recomendado por ellos. Se realizará una búsqueda de herramientas adecuadas para llevar a cabo este proceso, junto con el debate y reflexión sobre los distintos temas sobre los que versa este proyecto, creando un PLE sobre este propio tema en el que trabajamos.

En segundo lugar, se pretende mejorar la calidad del aprendizaje de los estudiantes y despertar el interés del alumnado por la reflexión sobre su identidad digital y sus propios procesos de aprendizaje, dirigiéndolos hacia la actualización profesional a través de PLE y PLN.

Identificar nuevas herramientas y/o servicios que el profesorado y alumnado puedan integrar en su PLE.

Ayudar a diseñar, producir y evaluar un PLE creado por alumnos/as, con el propósito de que sirva como herramienta para la mejora de la enseñanza en el ámbito de la ingeniería.

Evaluar la incidencia de la experiencia en los resultados académicos, valorando la eficacia del aprendizaje informal como complemento de los aprendizajes formales. Potenciar la transferencia de los resultados a otros ámbitos y contextos.

IV. Metodología

Como se ha comentado anteriormente este trabajo se llevará a cabo con alumnos de la Escuela Politécnica Superior de Jaén en el Grado de Ingeniería Electrónica Industrial. Creemos que fomentar en nuestros estudiantes la construcción de su entorno personal de aprendizaje en relación a los contenidos de la materia que estamos impartiendo, es al mismo tiempo desarrollar la competencia digital y "aprender a aprender".

Se pretende analizar y estudiar el concepto de PLE y Red Personal de Aprendizaje (PLN), tratando de una manera conjunta profesor-alumno de aprender conceptos relacionados con éstas, como herramientas a utilizar y metodología a emplear, y como llevarlas a la práctica con alumnos universitarios de la rama de ingeniería; para ello se ha contado con la colaboración de expertos en pedagogía y PLE.

Este estudio se realiza con el objeto de conocer si la implementación de un entorno personal de aprendizaje incluyendo la curación de contenidos relacionados con materias específicas es una estrategia didáctica adecuada a utilizar en el ámbito universitario enmarcada dentro de las nuevas competencias clave de la educación superior.

La definición de tareas en este trabajo se enumeran a continuación con división de las tareas asignadas al profesorado y las tareas asignadas a los alumnos.

A. Tareas profesorado

Tarea 1.- Conceptos relacionados con PLE, primeros pasos: Recopilamos información de la Red sobre PLE, material bibliográfico, creación de un lugar de encuentro como Foro y sitio del proyecto, para posteriormente compartir recursos y comentar a través del correo electrónico y de la red social de Google Plus (G+), donde se ha creado un grupo cerrado de trabajo (ver figura 3).

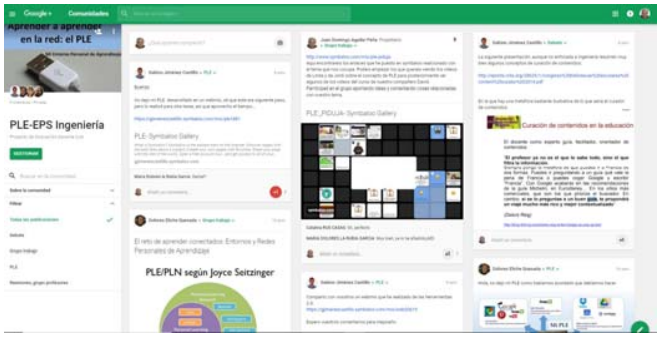


Figura 3.- Tarea 1. Creación de grupo en la red social Google Plus (G+)

Tarea 2.- Revisión de cursos MOOC con material sobre PLE: Destacando el MOOC [18] sobre entornos personales de aprendizaje, “Una experiencia de aprendizaje en red para construir o rediseñar tu Entorno Personal de Aprendizaje” Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado (Educalab).

Los miembros del grupo trabajan el concepto de PLE y PLN, analizando la distinta bibliografía y experiencias relacionadas con el tema [19,20,21]. Posteriormente hay una puesta en común de lo aprendido, mediante la realización de un seminario on-line sobre PLE en la universidad, reunión virtual de profesores expertos y miembros del grupo, realizado con Hangouts de Google y experimentado al mismo tiempo con este medio (ver figuras 4 y 5).

Tarea 3.- Recursos y herramientas, investigación y prueba: Se investigan algunos recursos y herramientas con los que se puede iniciar la construcción del PLE; para ello se debe probar y evaluar cada recurso y herramientas con el objetivo de poder mejorar nuestras actuaciones docentes.



Figura 4.- Captura de pantalla seminario on-line con presentación

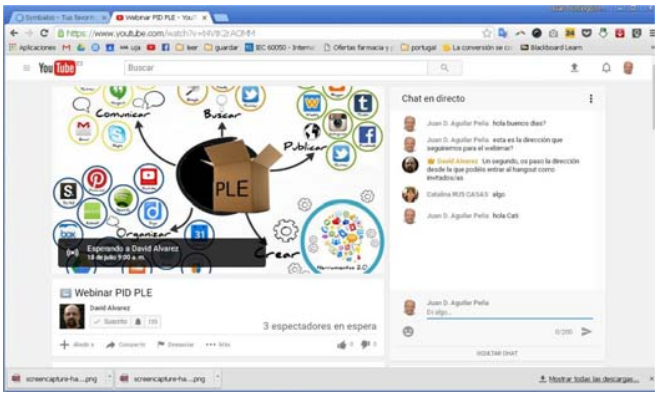


Figura 5.- Captura de pantalla seminario on-line con presentación, debate entre asistentes

Se realiza una jornada entre los miembros del grupo para intercambiar ideas sobre las distintas herramientas estudiadas, creando una cuenta común para el manejo de ellas y ver las posibilidades de utilización posterior junto con su aplicación. Cada profesor individualmente debe de reflexionar sobre su entorno personal de aprendizaje y plasmarlo en un diagrama como el representado en la figura 6, realizado por un miembro del grupo de trabajo, y compartirlo posteriormente con los demás.

Tarea 4.- Definiciones de nuestros PLE: Necesidades para el proyecto y objetivos a alcanzar. Utilización del navegador Web como esqueleto de nuestro PLE, utilizando para ello la herramienta Symbaloo, redes sociales y comunidades específicas de docentes y comunidades tecnológicas.

Búsqueda, filtrado y organización de la información con marcadores sociales, producción y publicación. Reunión del grupo de Trabajo, y finalmente se debate sobre el contenido de la encuesta individual sobre la experiencia para conocer el grado de satisfacción que se pasará a los alumnos tras la implementación de esta actividad de innovación docente



Figura 6.- Diagrama PLE de un miembro del grupo de trabajo

Tarea 5- Elaboración de la encuesta comentada anteriormente: Para la realización de estas encuestas nos hemos basado en los trabajos de Prendes (2014, 2016, 2017) [22,23,24], dentro del proyecto CAPPLE (www.um.es/ple), que tiene como objetivo estudiar cómo son los PLE de los futuros profesionales universitarios, estudiantes de último curso de las universidades españolas. En su fase de recogida de datos tiene como finalidad describir las estrategias y herramientas concretas utilizadas de forma habitual por estudiantes universitarios para enriquecer y gestionar su proceso de aprendizaje, dentro y fuera de las aulas, especialmente aquellas que tienen lugar en contextos electrónicos. Y en segundo lugar en el trabajo de Romero (2016) [25], donde el cuestionario trata de ser una herramienta que recoja la auto-percepción de los estudiantes sobre su entorno personal de aprendizaje, y reflejar si la potenciación del PLE y la curación de contenidos como estrategia didáctica es apropiada.

TABLA 1.- DIMENSIONES INCLUIDAS EN EL CUESTIONARIO[23]

DIMENSIÓN
AUTOPERCEPCIÓN
Motivación intrínseca
Conocimientos previos
Autopercepción
GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN
Procesamiento de la información
Gestión de la información
Organización de la información
Recuperación dela información
Creación dela información
GESTIÓN DEL PROCESO DE APRENDIZAJE
Pensamiento crítico
Aprendizaje abierto
COMUNICACIÓN
Comunicación
Participación y trabajo en equipo

En los primeros trabajos mencionados, se priorizan la recogida de información relativa a una serie de estrategias de aprendizaje y procesos cognitivos relacionados con el

aprendizaje de las personas; agrupadas en 4 dimensiones básicas, como son la autopercepción, gestión de la información, gestión del proceso de aprendizaje y comunicación.

En la tabla 1 aparecen las cuatro dimensiones con los distintos conceptos que hemos tratado en cada una de ellas.

Con respecto a la segunda parte del cuestionario, tal y como plasma Romero, se dividen las preguntas en distintos apartados [25]:

- Valoración general (valoración general de la actividad desarrollada)
- Valoración particular (valoración de las actividades desarrolladas en el marco de la asignatura)
- Metodología (instrucciones de la prácticas, trabajo colaborativo, implicación del alumno, evaluación dela actividad, conocimientos previos de la curación)
- Proyección (competencias digitales, posibilidades de continuar curando contenidos)

Se realizó el cuestionario inicial con la ayuda de una pedagoga, para posteriormente pasarlo a los profesores que estamos en este proyecto, eliminando aquellas cuestiones poco claras o redundantes y con la participación de un alumno de doctorado para delimitar si existían problemas en la compresión de los ítems. Una vez realizadas las correcciones oportunas se determinó la versión final.

Finalmente se decidió incorporar un total de 31 preguntas, con 61 items, distribuidos de la siguiente manera: 3 preguntas del tipo caracterización demográfica de escala nominal, 8 preguntas de la primera parte del cuestionario, 7 preguntas relacionadas con el manejo de herramientas informáticas empleadas en la curación de contenidos y construcción del PLE, y 13 preguntas del segundo bloque relacionado con la autopercepción, valoración, metodología y proyección; incluyendo al final una pregunta de tipo abierto.

Las distintas preguntas son básicamente de dos tipos: unas con un formato de respuesta tipo Likert, con múltiples ítems y con 5 opciones de respuesta ((1) Totalmente en desacuerdo; (2) En desacuerdo; (3) Ni de acuerdo ni en desacuerdo; (4) De acuerdo; (5) Totalmente de acuerdo, incluyendo un último de no usa) y otras de elección múltiple (tipo marca todo lo que corresponda)

B. Segunda Fase (en proceso de ejecución):

Ejecución con los alumnos de las tareas previstas en este proyecto de innovación sobre entornos personales de aprendizaje en el aula. Análisis y difusión de la experiencia.

En este proceso, la evaluación se considera fundamental, siendo indispensable obtener información para analizar el trabajo realizado. Para ello se plantea, además de la encuesta general, la creación de encuestas de evaluación de las actividades, el análisis de la participación de los estudiantes en las actividades propuestas, así como un análisis detallado de las tasas de rendimiento y éxito de alumnos no presentados con las de los cursos académicos anteriores.

C. Herramientas utilizadas

Existen en la red algunas herramientas que nos ayudan a elaborar, organizar y acceder de forma inmediata a las distintas partes de nuestro PLE, como por ejemplo utilizar Symbaloo como página de inicio (ver figura 7).



Figura 7.- Symbaloo como página de inicio [https://www.symbaloo.com/]

Una página de inicio, o también conocido como escritorio se trata de una herramienta que permite organizar y agrupar información de distintos recursos web, así como utilidades (widgets o gadgets), facilitando al usuario el acceso a sus funciones de uso frecuente. Es posible compartir o hacer públicas las páginas de inicio o webmix; así, un alumno, puede hacer uso de ellas, y compartir su información con la de los demás [26,27].

Para crear buenos contenidos es fundamental realizar una correcta "curación" para encontrar y seleccionar la información que mejor se adapte a nuestras necesidades.

¿Qué herramientas deberíamos utilizar para realizar eficazmente esta técnica?.

- De búsqueda:

Buscador Google y buscadores especializados como google académico [1], Microsoft academic [2], BASE [3], una de las plataformas de textos académicos más voluminosos de la web (y buscadores en general relacionados con las empresas y revistas del sector, de semiconductores [4], datasheet [5], blog, fabricantes y distribuidores del sector[6].

Para recoger entradas y RSS de distintos sitios y blog podemos utilizar Feedly[7], que es un lector de RSS que permite organizar y acceder rápidamente desde un navegador web o de

[1] https://scholar.google.es/
[2] https://academic.microsoft.com
[3] https://www.base-search.net
[4] http://www.sycelectronica.com.ar/buscador.ph
[5] (http://www.alldatasheet.com/)
[6] http://www.powerelectronics.com/
[7] https://feedly.com/

teléfonos inteligentes a todas las noticias y actualizaciones de blogs y demás páginas que el sistema soporta.

- De selección:

Estas herramientas permiten mediante la creación de etiquetas, clasificar los diferentes contenidos de ciencias por áreas y mediante etiquetado.

Pocket[8], es una aplicación informática y un servicio web que permite al usuario guardar y organizar todos los contenidos digitales que encontremos en la web, y que sean de nuestro interés, para poder leerlo más tarde. Va a facilitar la tarea de curación de contenidos digitales.

Para la realización de la selección de los recursos, es útil utilizar marcadores sociales como puede ser Diigo[9], este es un sistema de gestión de información personal basado en el concepto "nube", que incluye marcadores web, bloc de notas post-it, archivo de imágenes y documentos, así como selección de textos destacados . En el artículo de Saura [28] podemos encontrar un uso educativo de marcadores sociales de caracterización y difusión

- De caracterización:

Dar sentido o aportar valor añadido, en base a nuestros objetivos y conocimientos, es una fase clave, por lo que debemos otorgar un valor añadido a aquella información recolectada. El objetivo de producir contenidos más trabajados, que ofrezcan una información más completa o detallada a nuestro grupo o compañeros de clase (artículos de blog, informes especializados, tutoriales, etc.) una vez seleccionado el contenido más adecuado para el trabajo, aportando nuestro sello personal, es esencial.

Para la curación de contenidos Scoop.it [10] es una buena herramienta para reunir información, mostrarla y compartirla en Internet. Están incorporando la posibilidad de la curación de contenidos muchas de las herramientas que habitualmente utilizamos, como son por ejemplo mediante las " Colecciones" de Google Plus o mediante la creación de "Momentos" en Twitter.

- De difución

Una vez adaptado, finalizamos el proceso con la difusión del trabajo a través de la redes sociales o canales adecuados. En nuestro caso utilizaremos la red social de Google Plus, para difundir los contenidos con el resto de los compañeros.

V. Resultados y conclusiones

Este trabajo se encuentra en su segunda fase de implantación con el alumnado de Grado de Ingeniería Electrónica Industrial, en la asignatura optativa de " Sistemas de Adquisición de Datos" y en la troncal de tercer curso " Electrónica de Potencia", habiéndose terminado la primera fase relacionada con el profesorado participante.

Esta experiencia ha ayudado para que se aprenda y profundice en los distintos conceptos relacionados con PLE-PLN, su enfoque pedagógico, y manejo de distintas herramientas que se encuentran en Internet, analizando su posible aplicación en el aula universitaria. En la actualidad hay algo de información sobre su implementación en las aulas de enseñanza primaria y media, pero prácticamente nada, excepto contadas excepciones en educación superior. La realización de distintas funciones dentro del trabajo asignadas a cada uno y la colaboración con distintos expertos ha ayudado a que esta primera fase haya concluido con éxito.



Figura 8 .- Distribución de tareas entre los miembros del grupo

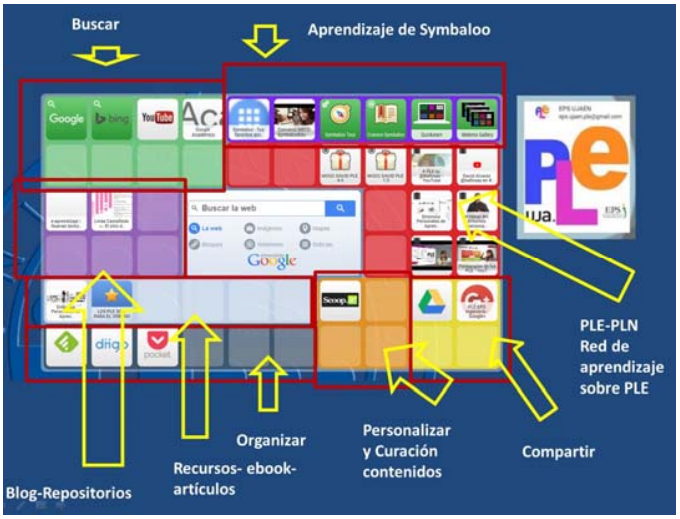


Figura 9.- Distribución del entorno personal de aprendizaje con Symbaloo y distintas partes del mismo

En la figura8 se presenta la distribución de tareas a realizar distribuidas entre el profesorado para la creación del PLE conjunto del grupo de trabajo de profesores, realizado con la herramienta Symbaloo, y que se ha trabajado a lo largo de toda la primera fase. Y en la figura 9 presentamos como ha quedado

[8] https://getpocket.com/
[9] https://www.diigo.com/
[10] https://www.scoop.it/

dividido en las distintas herramientas y material utilizado para la creación del PLE y la curación de contenidos: Búsqueda, selección, caracterización y difusión.

El profesorado participante espera con la implementación de esta innovación docente obtener una mejora en la implicación y participación de los alumnos dentro del proceso de aprendizaje, junto con un aumento de las tasas de rendimiento y éxito con respecto a cursos anteriores.

Este trabajo permitirá el incremento de participación del profesorado en la utilización de las TIC en la docencia, aumentar la participación del alumno en el diseño de su propio desarrollo curricular, y platear una reflexión sobre su identidad digital.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se está realizado como parte del Proyecto de innovación docente "Integración de Entornos y Redes Personales de Aprendizaje como Mejora de la Docencia Universitaria en Ingeniería" financiado por la Universidad de Jaén (PID55_201617), dentro del PLAN I2D-UJA2016

REFERENCIAS

[1] A.Rocher, I. Javier y A.Pérez. Un estudio acerca de la dedicación docente del profesorado universitario en el marco del Espacio Europeo de Educación Superior. 2011, REIFOP, 14 (4). (On line 10/2/2018 en: http://www.aufop.com/aufop/uploaded_files/articulos/1327436198.pdf)

[2] J. Cabero. Nuevas Tecnologías aplicadas a la Educación, Madrid, McGraw-Hill, 2007.1, 13-19

[3] J.Salinas. Nuevas modalidades de formación: entre los entornos virtuales institucionales y los personales de aprendizaje. En Tejada, J. (cood). Estrategias de innovación en la formación para el trabajo. Madrid: Tornapunta Ediciones, 2009, 209-224.

[4] J.Onrubia. Las tecnologías de la información y la comunicación como instrumento de apoyo a la innovación de la docencia universitaria. Revista Interuniversitaria de Formación del Profesorado, vol. 21, núm. 1, abril, 2007, pp. 21-36. Universidad de Zaragoza.

[5] ALFIN.04 Herramientas para la búsqueda y recuperación de información en internet [on line 11/2/2018 en http://www10.ujaen.es/conocenos/servicios-unidades/biblio/alfin04-herramientas-para-la-busqueda-y-recuperaci]

[6] J.Guallar y J. Leiva-Aguilera. El content curator. Guía básica para el nuevo profesional de internet. Barcelona: Ed. UOC, 2013.

[7] B. Steren dos Santos, J. Arriaga García de Andoaíny M. Costa Morosini. Una visión integral del abandono / org – Porto Alegre : EDIPUCRS, 2013.

[8] J.D.Aguilar-Peña et al. Aplicaciones docentes que fomentan el Entorno Personal de Aprendizaje (PLE). Actas TAEE (Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica) 2016. Sevilla [On line 1/1/2018 http://www.taee2016.org/index.php/es/actas]

[9] M.A Peña-Hita et al. Entornos Personales de Aprendizaje (PLE) comp mejorra de la docencia universditaria en ingeniería. Actas de las Jornadas Virtuales de Colaboración y Formación Virtual USATIC 2017. [On line 11/2/2018 en http://www.virtualusatic.org/?page_id=3308]

[https://youtu.be/gWzgHfBZlJI]

[10] L. Johnson, S. Adams,y K. Haywood. The NMC horizon report: 2011 K-12 edition. Austin, Texas: The New Media Consortium. 2011. Recuperado de http:// www.nmc.org/pdf/2011-Horizon-Report-K12.pdf.

[11] E.Martiny A. Moreno. Competencias para aprender a aprender.Alianza editorial . Madrid, 2009

[12] L. Castañeday J. Adell, Entornos Personales de Aprendizaje: claves para el ecosistema educativo en red. Alcoy: Marfil, 2013

[13] L. Castañeda. Entornos Personales de Aprendizaje. [Archivo de video]. [Recuperado 11/2/2018 https://youtu.be/MPUlHtYfSzA]

[14] J. Salinas,. Algunas perspectivas de los entornos personales de aprendizaje, in *TICEMUR 2008*, Lorca (MU), 2008.

[15] J. Ruiz-Palmero, J. Sánchez Rodríguez y M. Gómez García. Entornos personales de aprendizaje: estado de la situación en la Facultad de Ciencias de la Educación de la Universidad de Málaga. Píxel-Bit. Revista de Medios y Educación, Nº 42 Enero 2013 - pp.171-181

[16] D. Alvarez. Content Curation, del consumo a la creación de contenido [on line 1/1/2018] http://blog.educalab.es/mooc/2015/06/21/eduplemooc-unidad-4-content-curation-del-consumo-a-la-creacion-de-contenidos/

[17] Qué es la Curación de Contenidos y las 25 mejores herramientas. Claudio Inacio 1 agosto, 2017. Blog Aula CM.[on line 20/1/2018] http://aulacm.com/curacion-de-contenidos-herramientas/

[18] Entornos personales de aprendizaje. Una experiencia de aprendizaje en red para construir o rediseñar tu Entorno Personal de Aprendizaje. Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado. eEucalab http://educalab.es/intef

[19] P. R. Humanante Ramos, F. J. García-Peñalvo y M.A. Conde González. Entornos Personales de Aprendizaje y Aulas Virtuales: una Experiencia con Estudiantes Universitarios. VAEP-RITA Vol. 1, Núm. 4, Dic. 2013.

[20] V.Patricia López et al. La gestión de la información en entornos personales de aprendizaje: estudio exploratorio en alumnado de último curso de grado. Revista Complutense de Educación, 2017, 28 (4), pp.1303-1320.

[21] G.A. Moreno , J.A. Jimenez y W.S. Puche. Modelo de entorno de aprendizaje personal ubicuo. Actas TAEE (Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica) 2016. Sevilla [On line 1/1/2018 http://www.taee2016.org/index.php/es/actas]

[22] M.P. Prendes, at al. Componentes básicos para el análisis de los PLE de los futurosprofesionales españoles: en los albores del Proyecto CAPPLE. EDUTEC, Revista Electrónica de Tecnología Educativa, 47. 2016 [On line 1/1/2018 en: http://edutec.rediris.es/Revelec2/Revelec47/n47_Prendes-Castaneda-Ovelar-Carrera.html

[23] M.P.Prendes-Espinosa et al. Validación de un cuestionario sobre hábitos de trabajo y aprendizaje para futuros profesionales:explorar los Entornos Personales de Aprendizaje. RELIEVE, 22(2) (2016). [On line 1/1/2018 en http://dx.doi.org/10.7203/relieve.22.2.7228]

[24] P.Prendes, et al. "Personal Learning Environments in future professionals: nor natives or residents, just survivors." International Journal of Information and Education Technology 7.3 (2017): 172.

[25] Mª.J.RomeroTirado, Iniciación a la curación de contenidos en la universidad: una experiencia en el área de psicobiología. Revista de Educación a Distancia 49 (2016). [On line 19/2/2108. DOI: http://dx.doi.org/10.6018/red/49/6; http://www.um.es/ead/red/49/romero.pdf]

[26] S. Urbina Ramírez, M. Arrabal Cormenzana, M. Conde; C. Ordinas Pons. Las páginas de inicio como herramientas de ayuda para organizar el PLE. Un análisis comparativo.Edutec-e, Núm. 43, Marzo 2013.

[27] A. Delgado Domínguez. Organizando la docencia y el aprendizaje con Symbaloo. Actas del simposio-taller sobre estrategias y herramientas para el aprendizaje y la evaluación.pp 38-45, Andorra La Vella, 7 de julio 2015

[28] E.J Saura. Uso educativo de marcadores sociales: Diigo [On line 1/12018] https://es.slideshare.net/elesame/uso-educativo-de-marcadores-sociales-diigo

Medida de variables con Arduino en la asignatura Instrumentación Electrónica

C. Rus-Casas, G. Jiménez-Castillo, A. Fernández-Solas, J. I. Fernández Carrasco,
F. J. Muñoz-Rodríguez
Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática
Escuela Politécnica Superior de Jaén, Universidad Jaén, España
Email: crus@ujaen.es

***Abstract*— La instrumentación electrónica muestra a los graduados en ingeniería las claves en la medida de variables que intervienen en los procesos naturales o industriales, así como las consideraciones teóricas y prácticas de un proceso de medida real. En este trabajo se presenta la experiencia llevada a cabo para iniciar al estudiante en la automatización del proceso de medida utilizando una tarjeta de Arduino en el proceso de calibración de un sensor de temperatura.**

***Keywords*— Instrumentación electrónica; medidas automatizadas; sensores y Arduino**

I. INTRODUCCIÓN

Las universidades españolas siguen las líneas de orientación del Espacio Europeo de Educación Superior y su enfoque de formación en competencias para capacitar a los futuros ingenieros en las funciones de su profesión [1]. La docencia en ingeniería se apoya en la adquisición de competencias y coloca las prácticas de laboratorio en una posición importante que ayuda a la preparación profesional del futuro ingeniero. Esta enseñanza, basada en la solución de problemas potencia la autonomía de los estudiantes y la implicación de éstos en el proceso de enseñanza-aprendizaje [2-5].

Una de las tareas fundamentales para el estudiante en las distintas asignaturas de ingeniería electrónica en los laboratorios de electrónica es la medida las señales. La medida de las señales que afectan a un proceso industrial es una competencia de carácter transversal para los estudiantes de la rama ingeniería industrial [6].

La capacidad de llevar a cabo el diseño necesario para realizar las medidas de una señal está considerada como una de las habilidades técnicas más deseables para los graduados de ingeniería. Este aprendizaje integrador tiene como objetivo básico que los estudiantes apliquen lo que han aprendido para poder resolver problemas más complejos. El estudiante, a lo largo de las asignaturas del grado también debe desarrollar habilidades no exclusivamente técnicas como son la capacidad de resolución de problemas, el trabajo en equipo y la comunicación; posteriormente todo esto lo aplicará en su trabajo [7], [8].

En este trabajo se presenta la experiencia llevada a cabo para iniciar al estudiante en la automatización del proceso de medida utilizando una tarjeta de Arduino en el proceso de caracterización de un sensor de temperatura.

Seguidamente se presentan dos epígrafes que recogen los ámbitos en los que se basa este trabajo, por un lado experiencias docentes que usan plataformas hardware y software abierto y de otro lado cómo se abordan las prácticas de la asignatura Instrumentación Electrónica en diferentes universidades. Fruto de estas revisiones, los docentes implicados en este trabajo plantean iniciar en la medida automatizada de variables con Arduino en la asignatura Instrumentación Electrónica.

A. Aplicaciones docentes realizadas con Arduino en el ámbito docente del grado de ingeniería.

En el ámbito docente hoy en día se está dando un lugar importante a los sistemas basados en software y hardware abierto gracias a iniciativas como Arduino [9]. Lejos de ser sistemas excesivamente robustos y precisos están generando una corriente de aficionados a la electrónica entre los estudiantes que los profesores universitarios deben aprovechar. Son cada vez más los profesores e incluso los investigadores que usan Arduino para desarrollar aplicaciones en todos los campos [10].

En los últimos años las plataformas Hardware-Software de código abierto han sido ampliamente utilizadas en el entorno educativo en diferentes ámbitos del conocimiento. Arduino ha permitido que se proporcionen cursos en los que se requiere poca experiencia por parte del alumnado, además, suelen estar diseñados para realizarlos remotamente desde casa [11]. No solo se plantea utilizar Arduino en las escuelas de ingeniería, sino en diferentes niveles educativos, desde edades comprendidas de los cuatro a los seis años para el aprendizaje de programación de iniciación a la robótica [12] [14], a estudiantes de institutos [13].

Arduino es una plataforma de hardware abierto basada en software y hardware fácil de usar [14]. Hay una gran variedad de plataformas Hardware-Software libre, debido a ello, hay autores que han analizado las posibilidades que ofrecen las diferentes plataformas de Hardware-Software libre (Arduino, Freedom y Launchpad), sugiriendo incluso un procedimiento para la selección más idónea de la plataforma a escoger. Aunque puede ser una tarea ardua, puesto que depende de distintas circunstancias la elección de un hardware que solucione de la mejor manera posible un problema [15].

Hay experiencias, como la descrita en la asignatura "Sensores y Procesado de Señal" del Grado en Física que ha permitido al alumnado desarrollar proyectos relacionados con la monitorización de fenómenos físicos y el control sobre determinados actuadores en función del estado de la variable a monitorizar empleando Arduino. Como resultado de esta experiencia los alumnos han realizado proyectos que permiten

controlar la temperatura en un rango óptimo, riego automático para plantas según la humedad de estas, detención de obstáculo para la navegación robótica y una traducción del color a sonido [16].

Otras experiencias abordan la formación en robótica para potenciar la innovación del alumno y la motivación de estos durante su proceso de aprendizaje con el empleo de Hardware-Software de código libre. En este caso se utilizó Arduino para controlar Robots de cuatro ruedas con un brazo manipulador y drones educativos [17].

Además, es importante resaltar cómo este tipo de plataformas, de código libre, han permitido gracias a sus características abordar metodologías de Aprendizaje Basado en Proyectos (PBL, Learning Based in Project) en cualquier asignatura del ámbito de ingeniería, consiguiendo que el alumno se implique más en su proceso de aprendizaje, ya que intenta de resolver problemas de mayor complejidad [18].

También para solventar problemas en ámbitos multidisciplinares se ha empleado Arduino con éxito. Restos académicos en los que a los alumnos se le plantearon utilizar sistemas de impresión 3D de bajo coste y Arduino. Con ello, se permitió el desarrollo de competencias y habilidades [19].

Todas estas experiencias han animado a los profesores de Instrumentación Electrónica a plantear en una de las prácticas de la asignatura el uso de Arduino para la medida de temperatura y de esta forma iniciar a los estudiantes en el ámbito de los sistemas de adquisición de datos.

B. La asignatura Instrumentación Electrónica.

En la práctica industrial, un ingeniero en Electrónica Industrial y Automática manipula máquinas y procesos en los que se usan sensores. La correcta puesta en marcha de dichos sensores es esencial para que las máquinas y los procesos funcionen adecuadamente. De ahí que sean necesarios conocimientos de sistemas de medición e instrumentación. Medir de manera correcta ayuda a estudiar y resolver problemas de ingeniería de cualquier tipo. La formación en sistemas de medida e instrumentación está recogida en la orden CIN/351/2009 [20].

En la realización de esta trabajo, se han consultado las guías docentes de seis universidades españolas en las que se imparte la asignatura Instrumentación electrónica en la mayoría de los casos de la titulación Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática. Se trata de una asignatura obligatoria en todas las universidades consultadas. Es una asignatura principalmente de tercer curso de grado y que tiene asignados 6 créditos ECTS. El número de créditos se reparte entre 3 créditos teóricos y tres créditos prácticos. Sólo una universidad consultada asigna 4.5 ECTS.

Por este motivo en todas las universidades revisadas el número de horas de sesiones de laboratorio es grande. Este número de horas está comprendido entre 12 horas y 25 horas. Se debe matizar que en la universidad con el número menor de horas corresponde a la asignatura de 4.5 créditos ECTS.

La revisión realizada, que se muestra en la Tabla I, se ha centrado en aspectos como el tipo de evaluación llevada a cabo y si incorporan en la asignatura una práctica de sistemas de iniciación a la adquisición de datos como es el caso de nuestra experiencia.

TABLA I COMPARATIVA DE LAS PRÁCTICAS EN LA ASIGNATURA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA EN DIFERENTES UNIVERSIDADES.

	Tipo de evaluación	***Realizan prácticas de iniciación a la adquisición de datos***
Universidad A	Evaluación continua. Actividades de evaluación final.	No
Universidad B	Evaluación continua. Evaluación de prácticas. Examen final. Examen de prácticas	No
Universidad C	Evaluación continua. Examen de evaluación final Evaluación de prácticas. Evaluación de trabajos en grupo.	Si (Seminario)
Universidad D	Evaluación continua. Examen de evaluación final. Evaluación de prácticas.	Sí. *Actividades vinculadas:* *Entrega colección de problemas resueltos*
Universidad E	Examen de evaluación final. Trabajo académico. Pruebas objetivas (tipo test) durante cada una de las sesiones prácticas de laboratorio y dos en teoría.	No
Universidad F	Examen de evaluación final (100% de la nota) Memoria de prácticas para poder presentarse al examen final.	No

De las seis universidades cuya guía docente de la asignatura Instrumentación Electrónica ha sido consultada, tan solo dos incorporan un apartado específico para los sistemas de adquisición de datos. Pero sí hay que destacar que en todas las universidades consultadas se evalúa cuidadosamente el avance de los alumnos en la parte práctica. Por este motivo se ha valorado entre los docentes implicados en esta experiencia

incorporar una práctica dedicada a los sistemas de adquisición de datos que permita la integración de todos los contenidos de la asignatura, seguidamente se describe la experiencia.

II. DESCRIPCION DE LA EXPERIENCIA

Como se ha indicado anteriormente, en la actualidad la educación superior de calidad, debe tener las herramientas necesarias para desarrollar competencias en medida de señales.

Para conocer el comportamiento y evolución de las variables físicas como la temperatura, la presión, la luminosidad, el caudal, entre otras es necesario estudiar la respuesta de los sensores ante las variaciones físicas, técnicas de medida, acondicionamiento, sistemas de adquisición de datos y protocolos de comunicaciones industriales. En la tabla 2 se muestra el programa de prácticas que se lleva a cabo en la asignatura obligatoria de tercer curso Instrumentación Electrónica.

La Fig. 1 muestra el esquema llevado a la práctica en el que el estudiante pasa por todas las etapas necesarias para una correcta automatización del proceso de medida: Caracterización, acondicionamiento de señal y posteriormente procesamiento digital mediante una tarjeta de adquisición de datos para poder ser visualizada en un display o en la pantalla de un ordenador.

TABLA II. PROGRAMA DE PRÁCTICAS REALIZADO EN LA ASIGNATURA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA DE LA TITULACIÓN GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL.

Programa de Prácticas	
Bloques de prácticas	***Conceptos teóricos trabajados en las prácticas***
P1-P2	Diseño de circuitos de medida y adaptación de señal
P3-P4	Cálculo y diseño de circuitos atenuadores, amplificadores, valor eficaz, convertidores V/I - I/V, etc. -
P5-P7	Acondicionamiento de señal: diferencial y amplificador de instrumentación discreto e integrado.
P8-P10	Diseño de sistemas de medida de variables físicas mediante transductores de temperatura, luminosidad, etc.
P11	Introducción a los sistemas de adquisición de datos: Automatización del proceso de medida

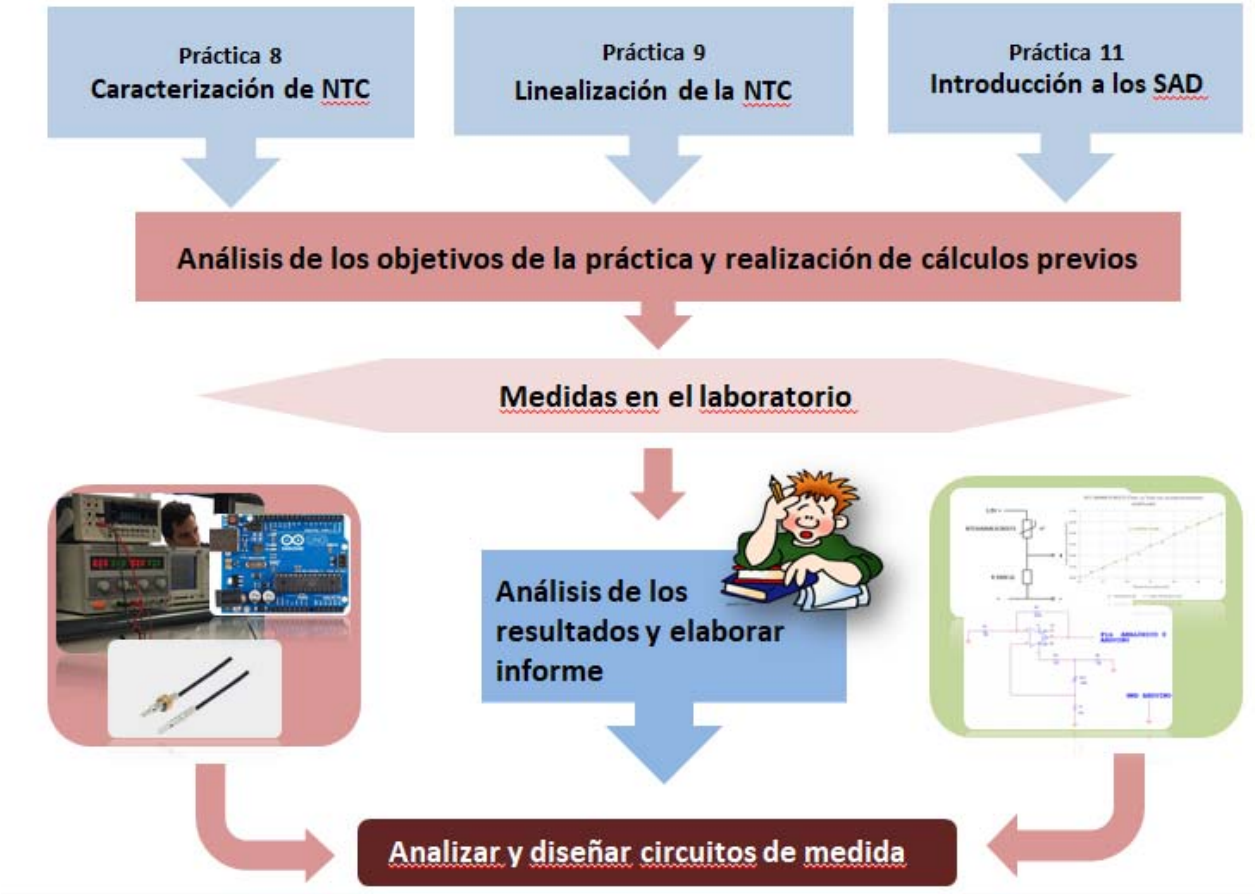


Fig. 2. Esquema de las prácticas en las que se monitoriza la temperatura con una tarjeta Arduino.

En la asignatura Instrumentación Electrónica se debe dar a conocer al estudiante el tratamiento de las señales procedentes de los sensores para poder ser medidas. Especialmente aquellas que requieren de instrumentación específica o técnicas de acondicionado. El sensor, en este caso de estudio una NTC (Negative Temperature Coefficient – coeficiente de temperatura negativo), convierte un fenómeno físico, la temperatura en una señal eléctrica medible. Este dispositivo cambia su valor de resistencia en función de la variable que se pretende medir (temperatura).

A los estudiantes de Instrumentación Electrónica se les plantean las siguientes sesiones prácticas relacionadas con este sensor

- Práctica 8 Caracterización de NTC

  Objetivos:

  a) Conocer el comportamiento de un sensor de temperatura tipo NTC, caracterizando su salida dentro de un rango de funcionamiento.

$$R_T = R_o * e^{\beta\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{To}\right)} \quad (1)$$

  b) Saber interpretar los parámetros de la hoja de características para poder realizar un diseño.

  c) Representar la curva teórica para las temperaturas que proporciona el fabricante.

  d) Comparar los valores teóricos con los que se adquieren experimentalmente en el laboratorio.

- Práctica 9 Linealización de la NTC

  Objetivos:

  a) Linealizar la respuesta del sensor usando el método de la resistencia serie.

  b) Analizar la sensibilidad de un circuito.

- Práctica 11 Introducción a los Sistemas de Adquisición de Datos SAD. Adquisición de datos de temperatura empleando una NTC y una placa de Arduino.

  Objetivos:

  a) Automatizar el proceso de medida de la temperatura empleando una tarjeta de Arduino y una NTC.

  b) Analizar la sensibilidad del circuito

En la práctica primera el estudiante se familiariza con el comportamiento del sensor y con los datos que el fabricante proporciona. En la segunda práctica se debe obtener la salida linealizada del sensor. Para ello será necesaria una etapa de acondicionamiento de señal.

En la última práctica se obtiene una salida en tensión proporcional a la temperatura que se está midiendo en el laboratorio que pueda ser interpretada por la tarjeta de adquisición de datos de Arduino. Es decir, las variaciones de tensión que se produzcan en el circuito deben coincidir con el fondo de escala que presenta uno de los canales de la tarjeta de adquisición de datos de Arduino. En este sentido, para adaptar la señal de tensión de pequeño nivel generada en la primera etapa del circuito es necesario amplificarla hasta los 5V. Este valor de 5 V coincide con el valor de fondo de escala de entrada del canal analógico de Arduino.

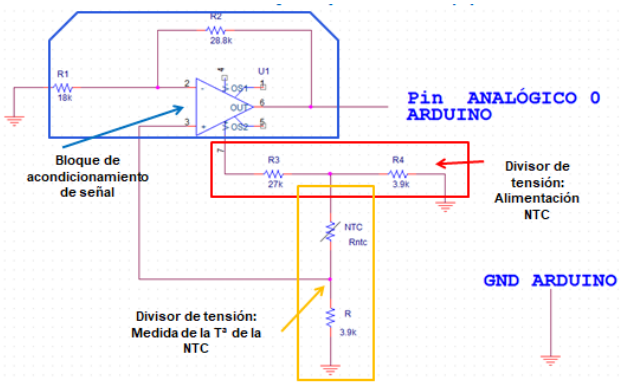


Fig. 2. Acondicionamiento de señal para monitorizar la temperatura de la NTC con una tarjeta Arduino.

De esta forma también se consigue hacer la señal más robusta frente a las posibles interferencias. Para el diseño de este bloque el estudiante debe ajustar la resolución teniendo en cuenta que el convertidor analógico digital de la tarjeta Arduino, la empleada en esta práctica tiene 10 bits.

En la asignatura, los estudiantes tienen el objetivo de adquirir experiencia sobre las características que debe poseer un sistema para medir de forma automatizada distintas magnitudes. Será en la práctica 11, en la que el estudiante convierte la señal del sensor alterada por la variación de un fenómeno físico, en este caso temperatura, en una señal eléctrica medible. Para ello diseña circuitos de acondicionamiento necesarios (linealización y amplificación) para presentarlos a la entrada de un canal de la tarjeta Arduino. Fig. 2. Posteriormente el estudiante realizará el programa en Arduino que permita realizar medidas de manera automática de la salida del circuito diseñado y almacenará las medidas en un fichero para su posterior calibración.

Esta aplicación, desde un punto de vista didáctico integra la totalidad de los temas tratados en la asignatura. Para los estudiantes, aunque inicialmente les resulta compleja, acaba siendo motivadora para los estudiantes.

III. RESULTADOS OBTENIDOS

En la evaluación de la asignatura Instrumentación Electrónica la parte práctica tiene un peso del 40% de la nota final. En el caso de las tres prácticas descritas en el epígrafe anterior suponen un 30% de la nota de prácticas. Para la evaluación de las prácticas se les ha definido a principio de curso una rúbrica sencilla. La rúbrica considerada en la

evaluación de todas las prácticas y tiene en cuenta aspectos como:

- Cálculos matemáticos involucrados en la práctica.
- Medidas realizadas con los instrumentos del laboratorio.
- Justificación de los resultados obtenidos.
- Cálculo de los errores.
- Conclusiones de la práctica.

La mejora del rendimiento académico de los estudiantes ha sido importante pero el equipo docente destaca la motivación de los estudiantes en su proceso de aprendizaje, ya que los estudiantes han completado las medidas propuestas con otras que no estaban planteadas en el propio guion de prácticas.

Al finalizar las prácticas se han propuesto una serie de cuestiones para conocer la opinión del alumnado. En la Tabla II se muestran dos cuestiones de carácter general en las que se pregunta al estudiante sobre su percepción del fomento de autoaprendizaje en la asignatura y sobre la efectividad de las prácticas en la comprensión de la asignatura. En este sentido los docentes destacan gratamente cómo un 82.33% de los estudiantes aprecian la conexión de los contenidos teórico prácticos, aunque algunos valorarían positivamente que en las sesiones prácticas no se emplease tanto tiempo para llevarlas a cabo.

TABLA III. CUESTIONES SOBRE LA ASIGNATURA Y LAS PRÁCTICAS EN GENERAL

Preguntas planteadas a los alumnos	**Respuestas obtenidas**
Cree que en la asignatura se fomenta el autoaprendizaje por parte del alumno.	1. Si: (94.44%) 2. No: (5.56%)
Crees que las prácticas te han ayudado a comprender y seguir mejor la asignatura	1. Si: (71,11%) 2. Si pero me han quitado mucho tiempo: (11.22%) 3. No (15,67%)

También se ha preguntado a los estudiantes sobre aspectos como:

1) Es adecuada y me ayuda a comprender bien el concepto asociado a la práctica
2) Está temporizada adecuadamente
3) La práctica me ha motivado en los contenidos de la asignatura

A estas preguntas se ha pedido que sean valoradas de 1 a 5. Las respuestas de la práctica 11, han sido recogidas en la Tabla III. Las respuestas de los estudiantes muestran la satisfacción por los contenidos planteados en la práctica 11: Introducción a los Sistemas de Adquisición de Datos SAD. Adquisición de datos de temperatura empleando una NTC y una placa de Arduino, así como por la temporización asignada y como este tipo de prácticas del laboratorio que permiten conectar la teoría con un problema real hace que los estudiantes se motiven y aumenten su interés por la asignatura.

TABLA IV. CUESTIONARIO REALIZADO A LOS ALUMNOS DE LA ASIGNATURA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA SOBRE LA PRÁCTICA 11 EN LA QUE SE USA ARDUINO PARA AUTOMATIZAR EL PROCESO DE MEDIDA DE TEMPERATURA

	Valoración de los estudiantes				
Preguntas planteadas a los alumnos	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*
1		*12%*	*25%*	*38%*	*29%*
2	*2%*	*6%*	*5%*	*14%*	*73%*
3			*19,7%*		*80,3%*

Los resultados finales de la asignatura han supuesto un incremento en la nota media de los alumnos en prácticas respecto a cursos anteriores. El último bloque de prácticas también ha influido en el aumento del número de estudiantes que han elegido la asignatura optativa Sistemas de Adquisición de Datos que es la asignatura que da continuación a los contenidos de la asignatura Instrumentación Electrónica.

IV. CONCLUSIONES

En este artículo se muestra como los estudiantes han considerado que las competencias experimentales que se ponen en práctica son más completas. Tras realizar la caracterización del sensor de manera automática con el programa realizado con Arduino, los estudiantes consideran que son más conscientes de los resultados del aprendizaje ya que en esta práctica controlan la instrumentación, generan y procesan los datos para calibrar el sensor en estudio.

En asignaturas obligatorias, con un elevado número de alumnos en clase, como es el caso de Instrumentación Electrónica el uso de un dispositivo como Arduino hace posible la realización de prácticas complejas. Arduino, además permite realizar una práctica de bajo costo y la posibilidad de usar su software libre que no implica la adquisición de paquetes de licencias de software comercial o tener que dedicar un tiempo específico a manejar el entorno de programación

En cuanto al profesorado implicado, consideramos que la experiencia ha sido satisfactoria. La medida de variables con Arduino en la asignatura Instrumentación Electrónica ha supuesto una experiencia positiva que potencia la innovación y la motivación de los alumnos durante su proceso de aprendizaje.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Vicerrectorado de enseñanzas de grado, postgrado y formación permanente de la Universidad de Jaén la subvención del proyecto “Integraciín de entornos y redes personales de aprendizaje como mejora de la docencia universitaria en la ingeniería (PLE-PLN)” Plan I2D-UJA 2016

REFERENCIAS

[1] S. Feinman-Nemser, "Teacher learning: How do teachers learning to teach," Cochran-Smith, M; Feinman-Nemser, Sh. Y McIntyre, DJ y Demers, KE Handb. Res. Teach. Educ. Endur. Quest. Chang. Context., pp. 697–705, 2008.

[2] L. D. Feisel and A. J. Rosa, "The role of the laboratory in undergraduate engineering education," J. Eng. Educ., vol. 94, no. 1, pp. 121–130, 2005.

[3] F.J. Muñoz, M. Torres, J.V Muñoz., C. Rus, J. D. Aguilar. And J Aguilera. Laboratorio Remoto para el Aprendizaje de los Sistemas Fotovoltaicos Autonomos. X Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica, TAEE 2012. http://taee.euitt.upm.es/actas/2012/navegacion/taee%202012/docs/0174-vf-000059.pdf .

[4] M. Torres, C. Rus, J.V Munoz., F.J. Munoz. Diseño de una aplicación docente para el control del equipamiento del laboratorio: PC-LAB. Revista de iniciciacion a la investigación. Ini Inv,6:a2 (2011). http://revistaselectronicas.ujaen.es/index.php/ininv/article/view/555 .

[5] M. Torres, C. Rus, J.V Muñoz., F.J. Muñoz. Desarrollo de un instrumento virtual con fines docentes para la asignatura Sistemas de Adquisición de Datos.. X Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica, TAEE 2012. http://remo.det.uvigo.es/TAEE/images/Actas/docs/0120-vf-000037.pdf

[6] M. A. Pérez, J. C. Campo, J. C. Antó, F. J. Ferrero, and G. Grillo, Instrumentación Electrónica. 2004.

[7] D. Jonassen, J. Strobel, C. Lee, L. Technologies, E. T. Programme, L. Sciences, and T. A. Group, "Everyday Problem Solving in Engineering :," J. Eng. Educ., vol. 9, no. 2, pp. 139–151, 2006.

[8] R. J. Robinson and J. Wellin, "Introducing Data Acquisition and Experimental Techniques to Mechanical Engineering Students in the Freshmen Year," 2002 ASEE Annu. Conf. Expo. Vive L'ingenieur!; Montr. Canada; 16-19 June 2002, 2002.

[9] Arduino, "Página Web de Arduino." [Online]. Available: http://www.arduino.cc. [Accessed: 21-Dec-2017].

[10] J.-C. Chou, R.-T. Chen, Y.-H. Liao, J.-S. Chen, M.-S. Huang, and H.-T. Chou, "Dynamic and wireless sensing measurements of potentiometric glucose biosensor based on graphene and magnetic beads," IEEE Sens. J., vol. 15, no. 10, pp. 5718–5725, 2015.

[11] J. Sarik and I. Kymissis, "Lab kits using the arduino prototyping platform," Proc. - Front. Educ. Conf. FIE, pp. 1–5, 2010.

[12] K. Ramírez-Benavides and L. A. Guerrero, "MODEBOTS: Entorno de programación de robots para niños de la primera infancia con edades comprendidas entre 4-6 años," VAEP-RITA Versión Abierta Español-Portugués – Rev. Iberoam. Tecnol. del Aprendiz., vol. 2, no. 3, pp. 139–146, 2014.

[13] L. M. Herger and M. Bodarky, "Engaging students with open source technologies and Arduino," ISEC 2015 - 5th IEEE Integr. STEM Educ. Conf., pp. 27–32, 2015.

[14] D. a Mellis, T. Igoe, M. Banzi, and D. Cuartielles, "Arduino: An open electronic prototyping platform," Proc. CHI, vol. 2007, pp. 1–11, 2007.

[15] M. A. Perales, F. J. Barrero, and S. L. Toral, "Análisis comparativo de distintas plataformas para la enseñanza de Sistemas Electrónicos Digitales," in TAEE 2016: XII Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica: Libro de Actas, 2016, pp. 26–33.

[16] P. Brox, G. Huertas-sánchez, A. López-angulo, M. Álvarez-mora, and I. Haya, "Diseño de sistemas sensoriales basados en la plataforma Arduino," in TAEE 2016: XII Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica: Libro de Actas, 2016, p. 532.

[17] P. Plaza, S. R. Automation, E. Sancristobal, G. Fernandez, and M. Castro, "Herramienta Colaborativa Robótica Educativa basada en Lógica Programable y Arduino," in TAEE 2016: XII Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica: Libro de Actas, 2016, pp. 420–427.

[18] H. González-Jorge, D. Roca, S. Torres, J. Armesto, and I. Puente, "Una experiencia de Aprendizaje Basado en Proyectos en el ámbito tecnológico: Diseño de un sistema de navegación indoor de bajo coste," Rev. Form. e Innovación Educ. Univ., vol. 7, no. 1, pp. 8–19, 2014.

[19] M. Fernandez-Vicente, L. Armesto, and A. Conejero, "Beneficios de la Integración de los Laboratorios de Fabricación Digital (FabLab) en la Educación Superior," Innovación Educ. en las enseñanzas técnicas Vol. II, vol. 144, no. September, pp. 1545–1554, 2014.

[20] Ministerio de Ciencia e Innovación, "Orden CIN/351/2009, de 9 de febrero, por la que se establecen los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial," 2009.

Aprendizaje-servicio como innovación estratégica en la enseñanza de la electrónica

Inmaculada Plaza García
Dpto. Ing. Electrónica y Comunicaciones
EUPT-Universidad de Zaragoza
Teruel (España)
inmap@unizar.es

Carlos Medrano Sánchez
Dpto. Ing. Electrónica y Comunicaciones
EUPT-Universidad de Zaragoza
Teruel (España)
ctmedra@unizar.es

Raúl Igual Catalán
Dpto. Ingeniería Eléctrica
EUPT-Universidad de Zaragoza
Teruel (España)
rigual@unizar.es

Ana Serrano Tierz
Dpto. de Ing. de Diseño y Fabricación
EINA-Universidad de Zaragoza
Zaragoza (España)
anatierz@unizar.es

Esther Sainz-Martín
Dpto. Ingeniería Eléctrica
EINA-Universidad de Zaragoza
Teruel (España)
esainz@unizar.es

Mariano Ubé Sanjuan, Isabel Saz
Dpto. Organización de Empresas
Universidad de Zaragoza
Teruel (España)
{mube, sazgil}@unizar.es

***Abstract*— El Aprendizaje-Servicio (APS) es una propuesta educativa que combina procesos de aprendizaje y servicio a la comunidad en un solo proyecto, trabajando sobre necesidades reales del entorno con el objetivo de mejorarlo. En el presente trabajo se muestran algunos ejemplos, especialmente proyectos fin de carrera, realizados con esta filosofía si bien no se habían sistematizado como ApS. Recogiendo esta experiencia, se presentarán las primeras acciones desarrolladas para implantar el APS en la titulación de Ingeniería Electrónica y Automática en la Escuela Universitaria Politécnica de Teruel, buscando combinar el aprendizaje de contenidos y competencias con la adquisición de habilidades y valores. La experiencia, aunque se encuentra en una etapa inicial, podrá servir de elemento de reflexión y debate sobre su implantación y extrapolación a otras titulaciones o asignaturas de electrónica.**

Keywords*— *Aprendizaje-servicio, Educación, Electrónica, Estrategia, Innovación, Valores

I. Introducción al Aprendizaje-Servicio

El Aprendizaje-Servicio (ApS) es una propuesta educativa que combina procesos de aprendizaje y servicio a la comunidad en un solo proyecto, en el cual los participantes se forman trabajando sobre necesidades reales del entorno con el objetivo de mejorarlo [1]. Se encuadra como una de las metodologías de investigación y docencia que refuerzan la calidad de la enseñanza.

El ApS es de una actividad compleja que integra el servicio a la comunidad con el aprendizaje de contenidos, competencias, habilidades o valores, a partir de la práctica reflexiva. Su fundamentación psicopedagógica coincide con las demandadas en el EEES. Las experiencias de ApS dan respuesta siempre a resultados de aprendizaje vinculados con las competencias propias de cada titulación, en el contexto del plan de estudios.

Hay una serie de componentes que configuran el aprendizaje servicio distinguiéndolo de otros conceptos afines como son el voluntariado o las experiencias de aprendizaje basado en la comunidad. Martínez-Odría [2] señala los siguientes: protagonismo de la voz del alumno, considerándolo un aspecto clave de los programas; atención a una necesidad real que surge desde la comunidad; conexión con los objetivos curriculares de aprendizaje; ejecución de un proyecto de servicio y reflexión.

Según Puig [3] las características que lo definen son [4]:

- Se trata de una metodología educativa utilizable en la educación formal y no formal, aplicable con diferentes poblaciones y en diferentes contextos.
- Propone un servicio a la comunidad que permita el aprendizaje y la colaboración en un marco de reciprocidad entre el contexto comunitario y los servicios educativos.
- Se basa en la adquisición por el alumno de los contenidos clásicos de la enseñanza, junto a la adquisición de conocimientos y competencias transversales.
- Se basa en la reflexión sobre el entorno social, sobre sus dinámicas de funcionamiento y sobre los problemas y desigualdades sociales.
- Requiere de la colaboración entre instituciones educativas y entidades sociales de servicios a la comunidad.
- Provoca cambios en diferentes niveles, tanto individuales, grupales, institucionales o comunitarios, así como de las políticas sociales y educativas vigentes.
- Para su correcta implementación requiere de la implicación de los diferentes grupos de interés afectados.

Por lo que respecta a las ventajas observadas al aplicar esta metodología, Martinez-Odría [2] señala que el alumnado mejora sus resultados académicos, aumenta su capacidad de asumir responsabilidades y despierta su creatividad; asimismo,

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

contribuye a desarrollar las distintas competencias genéricas. Otra de las ventajas que se asocia a esta metodología es que no sólo es útil exclusivamente para los alumnos, sino que permite además generar beneficios al entorno social en el que ellos se desenvuelven [5]. Kave [6] resalta que la importancia del Aps reside principalmente en que todos sus protagonistas pueden obtener beneficios de su puesta en funcionamiento. De una forma paralela, aunque no menos importante, el ApS permite establecer redes entre el centro formativo y las organizaciones de la comunidad, facilitando la tarea a la hora de articular soluciones a problemas comunes [7].

Los autores de este trabajo, han venido desarrollando algunas actividades que podían enmarcarse dentro de esta filosofía, generalmente proyectos fin de grado, relacionados con las líneas de investigación del grupo EduQTech [8], si bien no se había sistematizado nunca ni se había planteado como estrategia innovadora en el aprendizaje.

Buscando avanzar y mejorar en esta práctica, recientemente, se ha propuesto un proyecto de innovación docente para aprender qué es el ApS, sus connotaciones en la práctica educativa, cómo implantarlo en la enseñanza universitaria evaluando sus resultados y finalmente obtener conclusiones que puedan servir como punto de partida para otras titulaciones o compañeros docentes.

En el presente trabajo se explicarán algunas de las experiencias previas desarrolladas y las conclusiones obtenidas. Así mismo, se explicarán los pasos que se han definido y ya se han iniciado para implantar el ApS en la titulación de Ingeniería Electrónica y Automática en la Escuela Universitaria Politécnica de Teruel (EUPT). La experiencia, aunque se encuentra en una etapa inicial, podrá servir de elemento de reflexión y debate sobre su implantación y extrapolación a otras titulaciones o asignaturas de electrónica.

II. Ejemplos de experiencias previas

Como ejemplos de experiencias previas se van a describir tres ejemplos concretos, en diferentes momentos formativos: una primera experiencia planteada como tema de tesis doctorales, una segunda involucrando diferentes proyectos fin de carrera y la tercera desarrollada en el aula. De esta forma se dará una visión global de posibilidades formativas.

A. Aplicación de tecnología móvil (sensores vestibles y apps) para apoyar a los mayores en la práctica de mindfulness

A.1) Breve descripción

El término mindfulness agrupa algunas técnicas psicológicas de tercera generación que ayudan a aumentar la atención y la conciencia en el momento presente. Este trabajo surgió a partir de las necesidades expresadas, de forma independiente, por algunos profesionales del ámbito de la salud mental (psiquiatras y psicólogos) y de profesionales que trabajan con personas de la tercera edad. Por un lado, existe la necesidad de desarrollar tecnología que apoye y forme en la práctica de mindfulness, especialmente para aquellas personas que viven en el medio rural o no pueden asistir a grupos de formación presencial. Por otro lado, se detecta el miedo a caerse que los profesionales observan en los mayores. Uniendo estas dos líneas se propuso desarrollar tecnología móvil que permitiera a los mayores combinar la práctica de mindfulness con ejercicios físicos, para evaluar el impacto en su miedo a caerse.

A.2) Quienes colaboran

- Estudiantes de la Universidad de Zaragoza que están desarrollando su tesis doctoral en el Dpto. de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones.
- Médicos de familia del medio rural, Psicólogos y Psiquiatras.
- Residencia San Pablo, de Teruel
- Universidad de la Experiencia
- También ha colaborado en las primeras etapas el Colegio Oficial de Diplomados en Enfermería de Teruel.

A.3) Resultados previos

Se están desarrollando aplicaciones móviles (Smartphone y tabletas) para apoyar en la práctica de mindfulness, tanto en grupo como de forma autónoma. También se han mejorado algoritmos de detección y evaluación de la marcha a partir de datos de sensores inerciales (integrados o no en un Smartphone), para conocer si esta se ve afectada por la práctica.

Aunque inicialmente se pensó en personas mayores, la tecnología desarrollada será extrapolable para su uso en el ámbito de la salud, en concreto en neurociencia. A este respecto, también se están diseñando diversos sensores vestibles para conocer la postura y la estabilidad durante la práctica de mindfulness.

Los resultados, con un claro carácter social, se presentarán en 2 tesis doctorales.

B. TerBraille

B.1) Breve descripción

Bajo el nombre de “TerBraille” se recoge el diseño y desarrollo de dispositivos para la enseñanza del código Braille basados en hardware y software libres.

El proyecto surgió de las necesidades planteadas por dos profesionales que trabajaban con niños con discapacidad visual en la ciudad de Teruel. En concreto, propusieron desarrollar dispositivos para facilitar la enseñanza y el aprendizaje de los caracteres en código Braille a los niños con dificultades visuales, cubriendo una importante laguna en este campo.

El proyecto TerBraille se definió pensando en dos etapas:

- Una primera etapa en la que los usuarios pudieran conocer el aprendizaje de la escritura del código Braille a través de un dispositivo electrónico. En concreto, se centró en la enseñanza de los caracteres alfa-numéricos.
- Una segunda etapa, en la que se introduciría a los usuarios en el manejo del ordenador, reforzando el aprendizaje de los caracteres alfa-numéricos a la vez que extendiendo el aprendizaje a sílabas y palabras. Para ello se definiría un

software basado en el uso de la máquina Perkins, que posteriormente les permitiría trabajar con programas comerciales o existentes actualmente en el mercado.

Si bien los usuarios iniciales de los dispositivos serían niños ciegos y con dificultades visuales, su utilización se puede extrapolar a otros niños que no presentan estas discapacidades, pudiendo servir como herramienta para acercar el código Braille a las aulas. Así mismo, pueden constituir una herramienta útil para adolescentes y adultos que pierdan la visión, durante las primeras etapas de adaptación y aprendizaje.

B.2) Quienes colaboraron

- Estudiantes de la Escuela Universitaria Politécnica de Teruel que realizaron su proyecto fin de carrera bajo la tutela de profesores del Dpto. de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones.
- Miembros del grupo EduQTech
- Profesionales de apoyo para niños ciegos o con discapacidad visual, que trabajan en colegios de toda la provincia.
- Centro de Profesores y Recursos (CPR) de Teruel.

B.3) Resultados

Desarrollo de dos versiones del dispositivo electrónico y dos programas software: NELA y PerkApp (ver figura 1).



Fig. 1. TerBraille: Dispositivos electrónicos y programas informáticos: Nela y PerkApp.

El proyecto Nela recibió el 1er Premio en la categoría "Mejor proyecto de accesibilidad" y el Premio Especial del VI Concurso Universitario de Software Libre [9].

B.4) Resultados docentes

El proyecto se desarrolló en 5 proyectos fin de carrera, dirigidos desde el Dpto. de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones.

C. *Experiencia en una asignatura del Grado de Ingeniería Electrónica y Automática*

En el Grado de Ingeniería Electrónica y Automática, en concreto en la asignatura de Organización de Empresas, ya se ha desarrollado una experiencia piloto de Aprendizaje-Servicio. Si bien el contenido no está centrado en la enseñanza de la electrónica, si puede permitir introducir mejoras de contenido tecnológico en las organizaciones con las que se trabaja en la asignatura. Además posibilita la identificación, por parte del alumnado, de necesidades no cubiertas que pueden ser objeto de un emprendimiento cooperativo o social en un futuro. Se expone muy brevemente, para observar los resultados en nuestros alumnos. La experiencia se describe más ampliamente en el trabajo de Saz [5]

C.1) Breve descripción

En la experiencia se involucran alumnos, docentes y las entidades sin ánimo de lucro. Los alumnos deben mantener un contacto personal con estas últimas para realizar tareas de consultoría, analizando el entorno y el interior de la organización e identificando posibles estrategias de mejora para la entidad. De esta forma, los alumnos realizan una aplicación práctica de conceptos clave del ámbito de la planificación estratégica a unas entidades sociales, tal que se alcanza un beneficio tanto para éstas como para el propio aprendizaje

C.2) Quienes colaboraron

Agrupación Turolense de Asociaciones de Discapacidad Intelectual, ANUDI, Asapme Bajo Aragón, Asociación Española Contra el Cáncer Teruel, Banco de Alimentos Teruel, Club Voleibol Teruel, Cruz Roja Teruel, Fundación Amantes, Koopera-Teruel.

C.3) Resultados

Para evaluar la experiencia se diseñaron unos cuestionarios en los que los alumnos respondían mostrando su apreciación personal a través de [5]:

- Indicadores del proceso: significatividad del servicio, conexión con el currículum, reflexión, diversidad, protagonismo, seguimiento del proceso y duración e intensidad del mismo.
- Impacto educativo del aprendizaje-servicio: cuantificando la expectativa generada por el desarrollo de la experiencia, respecto a la vertiente académica-cognitiva, formación cívica, vocacional-profesional, ético-moral y personal.
- Cuestiones abiertas: sobre el logro de aplicación de contenidos, mejora de formación, motivación, aportación o posibles cambios de la experiencia llevada a cabo.

En el curso 2016-2017, los alumnos concluyeron que la experiencia les permitía reflexionar y conocer mejor la problemática social (77%) encajando con los contenidos académicos (94%). El 80% de los alumnos consideraba que les había servido para reflexionar sobre cuestiones de carácter ético-moral, y un 71% que les había influido en el ámbito personal.

Es relevante remarcar que el 94% consideró que la experiencia mejoraba su formación académica [5].

C.4) Perspectivas

Cabe añadir que en el presente curso 2017-18 se está realizando la continuación de la experiencia habida en el curso 2016-17, en lo que respecta a la asignatura de Organización de

Empresas y su aplicación a una entidad social determinada. De este modo, partiendo de los objetivos fijados en la entidad y desde el conocimiento de las estrategias en cuestión que ya fueron definidas, los alumnos están realizando la aplicación de un mecanismo de control estratégico.

En el mismo, tras diversas reuniones con la organización, se revisa el estado de cumplimiento de objetivos, de aplicación de estrategias y de efectividad de las mismas, una vez que ha transcurrido un periodo temporal suficiente. Se comprueba si han sido alcanzados dichas metas por un lado y, por otro, si han sido puestas en marcha las estrategias en cuestión. En este último caso, si así ha sido, se contrasta si han surtido efecto, dado el posible cumplimiento de objetivos.

Posteriormente procede realizar un análisis de los resultados de dicho mecanismo, yendo más allá. Es decir, si han existido desviaciones en cuanto al alcance de objetivos y puesta en marcha de las estrategias, procedería conocer el motivo de estas diferencias entre lo planificado y lo alcanzado.

Todo ello es lo que se espera alcanzar en esta segunda aplicación de esta experiencia de Aprendizaje-Servicio.

D. Conclusiones previas de estas experiencias

En las dos primeras experiencias descritas no se realizó una sistematización del proceso de Aprendizaje-Servicio: si bien se cumplieron algunos de los aspectos claves que caracterizan esta metodología (ver Tabla 1) no se planificó como ApS ni se planteó ningún tipo de evaluación para evaluar su consecución.

TABLA I. CUMPLIMIENTO DE CARACTERÍSTICAS DE APS EN LAS EXPERIENCIAS PREVIAS A) Y B)

Característica ApS	***Cumplimiento***	
	Sí	***No***
Atención a una necesidad real que surge desde la comunidad [2]	X	
Protagonismo de la voz del alumno [2]	X	
Conexión con los objetivos curriculares de aprendizaje [2]	X	
Ejecución de un proyecto de servicio [2]	X	
Reflexión [2]	X	X
Aplicable con diferentes poblaciones y en diferentes contextos [3] [4]	X	
Propone un servicio a la comunidad que permita el aprendizaje y la colaboración en un marco de reciprocidad [3] [4]	X	
Adquisición por el alumno de los contenidos clásicos de la enseñanza, junto a la adquisición de conocimientos y competencias transversales. [3] [4]	X	
Se basa en la reflexión sobre el entorno social, sobre sus dinámicas de funcionamiento y sobre los problemas y desigualdades sociales. [3] [4]	X	X
Requiere de la colaboración entre instituciones educativas y entidades sociales de servicios a la comunidad [3] [4]	X	
Provoca cambios en diferentes niveles, tanto individuales, grupales, institucionales o comunitarios, así como de las políticas sociales y educativas vigentes. [3] [4]	X	X
Requiere de la implicación de los diferentes grupos de interés afectados. [3] [4]	X	

En la Tabla 1 se han marcado Sí y No en las características que implican "Reflexión". El "Sí" responde a la necesidad de reflexionar sobre las necesidades planteadas y del entorno en el que surgen para poder diseñar y desarrollar soluciones que posteriormente sean usadas por los grupos a los que van destinadas. Sin embargo, no se desarrolló un verdadero proceso de reflexión posterior basado en una toma de datos que permitiera plantear estrategias futuras en los ámbitos planteados en la tabla. De facto, no se realizó una evaluación como la que se presenta en la experiencia "*C Experiencia en una asignatura del Grado de Ingeniería Electrónica y Automática*".

También se ha marcado "Sí" y "No" en la característica "Provoca cambios en diferentes niveles, tanto individuales, grupales, institucionales o comunitarios, así como de las políticas sociales y educativas vigentes", ya que los autores entienden que sí provoca cambios individuales y grupales, pero no cambios en las políticas sociales y educativas vigentes.

Aunque en las experiencias "*A. Aplicación de tecnología móvil (sensores vestibles y apps) para apoyar a los mayores en la práctica de mindfulness" y "B. TerBraille"*, no se realizó una evaluación directa de los aspectos relacionados con las características que se trabajan en el Aprendizaje-Servicio, sí se observaron algunas de las ventajas que suele conllevar esta metodología. En concreto:

- Fortaleció el vínculo estudiantes-docentes.
- Favoreció el voluntariado, constatándose un compromiso activo de los estudiantes y docentes con la comunidad.
- Incrementó la motivación por el aprendizaje y la participación de los estudiantes.
- Aportó nuevas perspectivas en los procesos de orientación profesional.
- Permitió la colaboración con organizaciones de la comunidad, añadiendo una nueva dimensión a la investigación.
- Fomentó la creación de equipos interdisciplinares.

III. MEJOREMOS: CAMINANDO HACIA LA INSTITUCIONALIZACIÓN DEL APS EN LA TITULACIÓN

A. ApS como innovación estratégica en el Grado de Ingeniería Electrónica y Automática

Con un espíritu de mejora continua e intentando aprender de otras experiencias, como la presentada en el punto "*C. Experiencia en una asignatura del Grado de Ingeniería Electrónica y Automática*" o la descrita por una de las autoras de este trabajo en el artículo [4], recientemente se solicitó un Proyecto de Innovación Estratégica al Vicerrectorado de Política Académica de la Universidad de Zaragoza. Estos proyectos desarrollan acciones de mejora conjunta de la docencia y de la calidad de la docencia contando para ello con el apoyo del equipo directivo del centro y del coordinador de la titulación.

El objetivo propuesto consiste en implantar el ApS en la titulación de Ingeniería Electrónica y Automática en la EUPT, buscando combinar el aprendizaje de contenidos y competencias con la adquisición de habilidades y valores.

Para implementarlo se adaptará el modelo de incorporación de la metodología definido por Jouannet et al. [10-11] involucrando ciertos procesos y actividades comunes que cubren desde el diseño hasta la evaluación de la actividad, orientados a asegurar que esta cumpla ciertos requisitos de idoneidad, principalmente relacionados con la vinculación entre las actividades, incluida la experiencia de servicio y los objetivos de aprendizaje.

Inicialmente, y como punto de partida se han definido las siguientes fases de trabajo:

1. Recopilación de información.

2. Aprendizaje de otras experiencias universitarias.

3. Convocatoria para la creación de un grupo de trabajo.

4. Realización de un análisis de actividades docentes en las que se podría desarrollar el ApS.

5. Invitación a diferentes organizaciones sin ánimo de lucro a colaborar en el desarrollo actividades y a formar parte del grupo de trabajo.

6. Incorporación de la evaluación de las actividades docentes relacionadas con el ApS.

B. Primeros pasos dados

Siguiendo el esquema de fases anteriormente definido, se ha procedido a recopilar información teórica que permitiera conocer el concepto de ApS (fase 1), así como experiencias previamente desarrolladas en otras titulaciones de la misma universidad (fase 2). Algunos de los conocimientos adquiridos se han presentado en este trabajo.

Ambas fases se han desarrollado a lo largo del primer cuatrimestre del curso 2017-2018 y han permitido contactar con la coordinadora del Programa de Innovación ApS de la Universidad de Zaragoza [12] y conocer la Red Universitaria Española de Aprendizaje-Servicio (ApS-U) [13], entre otras [14].

Las fases 3, 4 y 5 se han comenzado a desarrollar durante los meses de enero-febrero de 2018. En concreto, se ha organizado una jornada titulada “Innovación Tecnológica y Social” con el subtítulo “¿Quieres conocer oportunidades de TFG, prácticas en empresa, investigación, etc. con finalidad social?” y la explicación previa “Te explicamos oportunidades de colaboración con distintas entidades de ámbito social. Para estudiantes, profesores y PAS.”

La jornada se ha divido en dos sesiones de dos horas máximo de duración realizadas los miércoles de 12 a 14, horario en el que se paralizan todas las clases para facilitar que los alumnos y profesores puedan participar en actividades específicas del centro.

En la primera sesión se va a introducir a los asistentes en los conceptos de “innovación tecnológica” e “innovación social”. Posteriormente se presentarán oportunidades de colaboración a través de actividades docentes (prácticas o TFG), con la Federación de Asociaciones de Vecinos de Teruel, con el Servicio de Bomberos, la Diputación Provincial de Teruel y Coordinación de Emergencias y Protección Civil de un instituto de la ciudad y con la Cámara de Comercio de Teruel.

En la segunda sesión se desarrollará una mesa redonda en la con la participación de diferentes entidades turolenses mostrando oportunidades de colaboración desde el campo de la Ingeniería. Las entidades invitadas han colaborado en las experiencias descritas en el punto “II. Ejemplos de experiencias previas”: Cáritas, Atadi, Anudi… También se cuenta con la participación de la Diputación Provincial de Teruel, explicando el programa de Revitalización Territorial.

Tras esta jornada se va a abrir un periodo de diez días para la creación de un grupo de trabajo, constituido por estudiantes, profesores y personal de administración y servicios que voluntariamente quieran participar en la implantación del ApS en el Grado de Ingeniería Electrónica y Automática. Se invitará a las organizaciones anteriormente mencionadas a formar parte de este grupo.

Los voluntarios para participar en esta iniciativa, junto con el Equipo Directivo de la EUPT serán los encargados de definir las actividades de implantación; implantación que tendrá lugar a modo de pilotaje en el segundo cuatrimestre del curso 2017-2018 si bien su consolidación definitiva no tendrá lugar hasta el curso 2018-2019.

Es necesario plantear una planificación que englobe dos cursos, para permitir establecer un contacto previo con los conceptos y conocer a las personas dispuestas a involucrase en el mismo, a la par que definir bien los objetivos y las herramientas de evaluación que serán aplicables en la experiencia, adaptando y simplificando la metodología de Jouannet [10-11]. Estos hitos se cumplirán durante el primer curso, reservando para el segundo una implantación con toma de datos y extracción de conclusiones que permita caminar hacia la institucionalización del ApS en la titulación.

IV. Instrumentos de evaluación – Visión preliminar

Una de las principales carencias observadas en las experiencias previamente realizadas por los autores de este trabajo, ha sido la falta de definición de instrumentos de evaluación que permitieran valorar los resultados obtenidos desde una visión global de ApS.

En este proyecto se está atendiendo especialmente a cubrir dicha deficiencia. Para ello, se adaptarán algunas de las encontradas en la literatura y que se han utilizado previamente en experiencias similares. A modo de ejemplo citaremos la Rúbrica de Autoevaluación para la Institucionalización del ApS de Furco [15], la relación de técnicas de recogida de información, objetivos e informantes propuesta por Martínez-Vivot [16] o el diseño de la evaluación planteada por Agrafofo [17].

V. Conclusiones

En la Universidad formamos profesionales que tendrán en su mano construir su futuro y provocar cambios en diferentes niveles: individuales, grupales o institucionales. Por ello deben ser capaces de reflexionar sobre su entorno social y los problemas y necesidades que de él derivan.

El ApS es una propuesta educativa que combina procesos de aprendizaje y servicio a la comunidad en un solo proyecto, trabajando sobre necesidades reales del entorno con el objetivo de mejorarlo. La idea no es nueva y ya se viene aplicando en otras universidades y titulaciones.

Los autores de este trabajo han venido desarrollando experiencias en las que los alumnos universitarios utilizaban sus conocimientos para dar respuesta a necesidades detectadas; mayoritariamente desarrollando dispositivos electrónicos en el ámbito de la salud. Las experiencias previas fueron muy positivas, observándose una alta motivación e implicación de los estudiantes, altos resultados académicos, así como satisfacción entre las partes implicadas (profesores, alumnos, entidades sociales y centro). Sin embargo, los docentes no se habían planteado sistematizar esta metodología para evaluar su impacto real en aspectos como el servicio a la comunidad, o reflexión sobre el entorno social, entre otros.

Para solventar esta laguna y consolidar un proceso de mejora continua se ha planteado un proyecto de innovación estratégica para implantar la metodología del Aprendizaje-Servicio en el Grado de Ingeniería Electrónica y Automática de la EUPT en colaboración con el equipo directivo y el coordinador de la titulación.

Tras los primeros pasos ya dados, se constata la buena predisposición de las entidades sociales locales para avanzar en este tipo de iniciativas. También un grupo de profesores ha mostrado un alto interés, enmarcado principalmente en la dirección de TFG y tesis doctorales desarrollando tecnología para bienestar y salud. No obstante, en este proyecto se pretende avanzar también hacia etapas previas, incorporando el ApS en algunas asignaturas de la titulación. Al respecto, en este trabajo se han mostrado los datos de la evaluación obtenidos tras su implantación en una asignatura de esta titulación. Los resultados positivos hacen plantear la buena aceptación de la metodología por parte de los estudiantes.

Como se ha mencionado previamente, la experiencia descrita en este trabajo, aunque se encuentra en una etapa inicial, podrá servir de elemento de reflexión y debate sobre su implantación y extrapolación a otras titulaciones o asignaturas de electrónica.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Vicerrectorado de Política Académica de la Universidad de Zaragoza su apoyo a través del proyecto PIEC_17_157 en la convocatoria 2017-2018. Así mismo, agradecen al Gobierno de Aragón y al Fondo Social Europeo su reconocimiento al grupo EduQTech (T49_17R).

Referencias

[1] Puig, J.M. & Palos, J. (2006). "Rasgos pedagógicos del aprendizaje–servicio". Cuadernos de Pedagogía, 357, 60–63.

[2] Martínez-Odría, A. (2007). Service-learning o aprendizaje-servicio .La apertura de la escuela a la comunidad local como propuesta de educación para la ciudadanía. Navarra: Universidad de Navarra.

[3] Puig, J. (coord.) (2009). Aprendizaje servicio. Educación y compromiso cívico. Barcelona: Graó.

[4] Saz, Isabel; Ramo, R.M. (2015). Aproximación a los impactos y beneficios del aprendizaje servicio en la Universidad de Zaragoza. RIDAS, Revista Iberoamericana de Aprendizaje y Servicio, 1, 9-27. DOI10.1344/RIDAS2015.1.2

[5] Saz, I., Ubé, M. y Guillén, R. (2017) Aprendizaje-Servicio en Management en Campus de Teruel. En Martínez Lozano, V. et al (coord.): Derribando muros. El compromiso de la Universidad con la justicia social y el desarrollo sostenible. VIII Congreso Nacional y III Internacional de Aprendizaje-Servicio Universitario APS-U8. Sevilla 2017. Libro de Comunicaciones. Ed. Comunicación Social, Salamanca. Próxima Publicación. También en Programa y Libro de Abstracts. Ed. Comunicación Social, Salamanca, 128-129.

[6] Kaye, C.B. (2010). The Complete Guide to Service Learning: Proven, Practical Ways to Engage Students in Civic Responsibility, Academic Curriculum, & Social Action. Minneapolis, MN: Free Spirit Pub.

[7] Tapia, M. N. y Hernán, A. (2013). Manual para docentes y estudiantes solidarios. Buenos Aires: CLAYSS. Centro Latinoamericano de Aprendizaje y Servicio Solidario.

[8] EduQTech: http://eduqtech.unizar.es/ Página Web del grupo Education-Quality-Technology (EduQTech). Fecha último acceso: febrero 2018.

[9] Matías, E.; Plaza, I. y Tregón, N. Nela: Aprende a escribir usando Braille Novática nº 221, pp. 57-61, enero-febrero 2013

[10] Jouannet, C., Salas, M. H., & Contreras, M. A. (2013). «Modelo de implementación de Aprendizaje Servicio (A+S) en la UC: Una experiencia que impacta positivamente en la formación profesional integral". Calidad en la Educación(39), 197-212.

[11] Jouannet, C.; Montalva. J.T.; Ponce, C.; Von Borries, V. (2015). Diseño de un modelo de institucionalización de la metodología de aprendizaje servicio en educación superior. RIDAS, Revista Iberoamericana de Aprendizaje y Servicio, 1, 112-131. DOI 10.1344/RIDAS2015.1.7

[12] ApS-Unizar: http://www.unizar.es/aprendizaje_servicio/index.html Página Web del Programa de Innovación Aprendizaje – Servicio de la Universidad de Zaragoza. Fecha último acceso: febrero de 2018.

[13] ApS-U: https://sites.google.com/site/redapsuniversitario/home Página Web de la Red Universitaria Española de Aprendizaje-Servicio (ApS-U). Fecha último acceso: febrero de 2018.

[14] Rodríguez M. El Aprendizaje-Servicio como estrategia metodológica en la Universidad Revista Complutense de Educación Vol. 25 Núm. 1 (2014) 95-113

[15] Furco, A. (2001). Rúbrica de autoevaluación para la institucionalización del aprendizaje-servicio en la educación superior (revisión 2003). Educación Global Research, 77-88.

[16] Martinez-Vivot, M., & Bertomeu, P. F. (2015). Evaluación participativa, Aprendizaje-Servicio y universidad. Profesorado. Revista de Currículum y Formación de Profesorado, 19(1), 128-143.

[17] Agrafojo, J.; García, B.; Jato, E. (2017). Aprendizaje servicio e innovación educativa en la Universidad de Santiago de Compostela: estrategia para su institucionalización. RIDAS, Revista Iberoamericana de Aprendizaje Servicio, 3, 23-34. DOI10.1344/RIDAS2017.3.3

Adaptación de las prácticas de la asignatura de Instrumentación Electrónica a la modalidad semipresencial

Medrano-Sánchez, Carlos
EduQTech, EUPT, Dpto. de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza
Teruel, España
ctmedra@unizar.es

Igual-Catalán, Raúl
EduQTech, EUPT, Dpto de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Zaragoza
Teruel, España
rigual@unizar.es

Plaza-García, Inmaculada
EduQTech, EUPT, Dpto de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza
Teruel, España
inmap@unizar.es

Bono-Nuez, Antonio
EINA, Dpto. de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España
antoniob@unizar.es

Martín-del-Brío, Bonifacio
EINA, Dpto. de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza
Zaragoza, España
bmb@unizar.es

***Abstract*— En este proyecto se pretende realizar la adaptación de las prácticas de laboratorio de la asignatura de Instrumentación Electrónica del grado de Ingeniería Electrónica y Automática a la modalidad semipresencial. Presentamos el diseño y el material necesario para realizar dicha adaptación: guiones de prácticas, simuladores, material complementario de apoyo, etc. Además, se identificarán las herramientas de Moodle que permitan gestionar las prácticas y verificar su realización, de forma que el profesor pueda evaluar el progreso del alumno de una forma efectiva, informando a su vez al estudiante.**

Keywords — Instrumentación Electrónica, enseñanza semipresencial, prácticas de laboratorio.

I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo tiene su origen en el interés desde la Escuela Universitaria Politécnica de Teruel (Universidad de Zaragoza) en ampliar su oferta formativa. Así, se convocó a una reunión a todos los profesores del centro en noviembre de 2014. Fruto de dicha reunión se formaron varios grupos de trabajo constituidos por voluntarios, entre ellos, el grupo de "Formación Semipresencial". Tras presentar el trabajo en varias Juntas de Centro, se aprobaron varias vías como prioritarias en julio de 2015. Entre ellas está la adaptación del Grado en Ingeniería Electrónica y Automática a la modalidad semipresencial, manteniendo también la opción presencial.

La propuesta se trasladó a la Escuela de Ingeniería y Arquitectura, en el Campus Río Ebro (Zaragoza), que imparte la misma titulación. En concreto se realizaron las siguientes acciones:

- Reuniones previas de los equipos directivos de los dos centros.
- Reuniones de las Comisiones de Garantía de la Calidad Conjunta para el Grado de Ingeniería Electrónica y Automática.

Finalmente, en enero de 2017 se aprobaron las propuestas de modificación de la Memoria de Verificación del Grado, incluidas en el Plan Anual de Innovación y Mejora, para dar cabida a la opción semipresencial. Actualmente se está trabajando en la modificación de la Memoria del título, que incluye otros aspectos debido al tiempo transcurrido desde que se redactó el documento original. La implantación se realizaría curso a curso, empezando por primero en el curso 18/19 como pronto.

Además de estos trámites y documentación, numerosos profesores a nivel individual han estado reflexionando y preparando el paso a semipresencial de sus asignaturas. Las alternativas de cursos online y semipresenciales ("Blended Learning") han atraído un gran interés desde hace varios años ([1, 2]). La enseñanza de laboratorio es un reto adicional. En un trabajo previo [3] se realizó un estudio de los requisitos para adaptar 13 asignaturas del grado de Ingeniería Electrónica y Automática a la modalidad semipresencial. Se analizaron varias soluciones que combinan diferentes herramientas para enseñanza práctica: laboratorios virtuales, escritorios virtuales, laboratorios de bajo coste y laboratorios remotos. La estimación de la parte práctica que podía ser realizada por los estudiantes en casa dependía de la asignatura en cuestión, en un margen de 0% a 85%.

Como continuación al trabajo previo en común [3], en la asignatura de Instrumentación Electrónica se ha continuado con la búsqueda de información y se ha ido un paso más allá adaptando el material de prácticas de laboratorio para una posible modalidad semipresencial. La realización de prácticas de laboratorio pensando en un alumno semipresencial plantea una serie de retos:

- ¿Qué parte de los circuitos típicos con sensores y de acondicionamiento de señal es posible/aconsejable simular?
- ¿Qué alternativas viables puede tener un estudiante para trabajar con sistemas de adquisición de datos sin desplazarse a la universidad?
- ¿Qué herramientas de Moodle pueden ser utilizadas para realizar un seguimiento de las prácticas?

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

En este estudio veremos lo que se ha avanzado en el diseño de la asignatura hasta ahora, y reflexionaremos sobre su posible evaluación previa, aplicación para la mejora de la docencia presencial y el trabajo futuro que resta.

II. MÉTODO DE TRABAJO

En este estudio se parte del material de prácticas en modalidad presencial. Para cada práctica, se ha realizado un trabajo consistente en comprobar qué parte podría ser simulada por el alumno sin desplazarse a la universidad. En algunos casos se han desarrollado materiales específicos (simuladores o vídeos de apoyo), mientras que en otros se ha recurrido a simuladores ya desarrollados (LTSpice). Se ha intentado mantener un equilibrio entre la simulación y el trabajo de montaje presencial, de forma que ambos estén compensados (aproximadamente a la mitad como veremos posteriormente). Las prácticas de la asignatura de Instrumentación Electrónica se pueden dividir en dos grandes grupos: trabajo con tarjetas DAQ para PC y sensores y acondicionamiento de señal. En ambos se ha planteado tanto simulación como montaje físico. Inicialmente se pensó en esta división simulación – montaje (modelo que llamamos a lo largo del artículo como Semi-1).

Sin embargo, a lo largo del trabajo, y junto con las reflexiones similares para otras asignaturas, surgió la posibilidad de pensar en un estudiante que pudiese realizar sus propios montajes en casa con equipamiento de laboratorio de bajo coste. Tal equipamiento sería reutilizable en su mayor parte por varias asignaturas del ámbito de la electrónica. Este es el modelo que llamamos Semi-2.

III. DESCRIPCIÓN DE LAS PRÁCTICAS

Se van a pasar a describir las prácticas en sus tres versiones: enseñanza presencial (versión actual) y dos versiones de enseñanza semipresencial, una suponiendo que los estudiantes poseen equipamiento en casa para realizarlas (versión semi-2), y otra suponiendo que no lo tienen (versión semi-1).

A. Descripción de las prácticas en el marco presencial actual

En la actualidad, las prácticas que se realizan son las siguientes, descritas con brevedad:

- Práctica 1: Introducción al entorno de trabajo con la tarjeta DAQ. En esta práctica se realiza una introducción al entorno de trabajo en Linux y al lenguaje Python, que será el entorno usado para controlar la tarjeta. Se presentan los conceptos y tipos de datos básicos en Python y se realizan ejercicios básicos en Python.
- Práctica 2: E/S simples con la tarjeta DAQ LabJack U3-HV. En esta práctica se adquieren los conocimientos básicos para acceder a la tarjeta [4] desde la línea de comandos en Python. Se configuran los pines de E/S y se controlan las entradas de tipo digital (E/S), entradas analógicas y sus diferentes rangos y salidas analógicas. El acceso es de tipo comando/respuesta, por lo que la respuesta temporal no es precisa. Los alumnos deben intentar obtener diversas ondas de salida de baja frecuencia y capturar entradas analógicas en diversos rangos.
- Práctica 3: Modo streaming y contadores con la tarjeta DAQ LabJack U3-HV. En esta práctica se explica el modo streaming de operación, con una captura temporal precisa de entrada. Además, se exploran algunas posibilidades de los contadores de la tarjeta. Los alumnos deben capturar una señal de entrada generada externamente para después visualizar varios períodos, razonando la relación entre la frecuencia de captura que han establecido y los puntos obtenidos. También se capturan pulsos de una señal externa, filtrándolos para evitar rebotes.
- Práctica 4: Muestreo y aliasing. En esta práctica, se tratan los conceptos de muestreo y aliasing. Se captura una señal luminosa de tubos fluorescentes con una LDR y la tarjeta DAQ que el alumno ya conoce. Se reproduce la señal de entrada con una salida analógica de la tarjeta a un altavoz. Los alumnos deben ser capaces de capturar la señal de entrada y razonar su forma. También tienen que ser capaces de observar el efecto de la señal cuando se muestrea a bajas frecuencia, en particular como se “oye” la señal capturada por el altavoz, y cómo se podría evitar con un filtro.
- Práctica 5: Conversión AD y DA. En esta práctica se utilizan unos conversores básicos ADC-0804 y DAC-0808 para montaje en protoboard. Se trabaja sobre la configuración del chip ADC para realizar conversiones única o en modo continuo, y para cambiar el rango del conversor, así como conversiones básicas DAC.
- Práctica 6: Simulación de amplificadores diferenciales y de instrumentación. En esta práctica se utiliza LTSpice para simular la estructura básica de un amplificador diferencial y otro de instrumentación con 3 operacionales. A partir de la simulación, se obtiene la ganancia diferencial, común y el CMRR contrastando con las fórmulas obtenidas en teoría. El tipo de entrada en cada caso (voltaje únicamente diferencial o únicamente común) es un concepto importante también en esta práctica.
- Práctica 7: Medida de temperatura: diodo y Amplificador diferencial. En esta práctica se estudian primero, un amplificador diferencial comercial, del cual se miden sus características. Después este sistema es usado en un montaje con diodo para medir el cambio de temperatura del componente.
- Práctica 8: Medida de temperatura: termopar y amplificador de instrumentación. En esta práctica los estudiantes deben medir las propiedades de una estructura con un amplificador de

instrumentación comercial, para después aplicarla a la medida de temperatura con un termopar.

La evaluación de las prácticas de laboratorio se realiza in situ durante la propia práctica y a partir del material entregado por el alumno en papel (cálculos y explicaciones).

B. Prácticas en la modalidad semipresencial semi-1

La estructura de las prácticas en esta modalidad, en la que se asume que los estudiantes no tienen equipamiento electrónico en su casa, se resume en la tabla I:

Se han realizado varios materiales de apoyo. En la práctica 1, la explicación que realiza el profesor en clase del entorno de trabajo se ha sustituido por vídeos docentes. Los vídeos explican básicamente el entorno de trabajo en Linux, la consola de Python y la realización de funciones básicas en Python. Si los alumnos no tienen la posibilidad de instalarse Linux en su ordenador, también se ha realizado un vídeo que indica cómo trabajar con Python en Windows. En Windows se recomienda utilizar el entorno Anaconda [5] por su facilidad de instalación. Anaconda instala automáticamente Python, una consola avanzada de Python, un editor (Spyder) y librerías gráficas. Se muestra en el vídeo como configurar las librerías gráficas y la instalación de la librería portalocker [6]. Ambas son necesarias para el simulador de la tarjeta (E/S simples) que se describe a continuación. La librería portalocker permite acceder a recursos compartidos en sistemas operativos Windows de manera similar al sistema operativo Linux, en el que se realizó el simulador inicialmente.

TABLE I. LISTA DE PRÁCTICAS EN LA MODALIDAD SEMI-1

Práctica	Presencial	Comentarios
Práctica 1: Introducción al entorno de trabajo con la tarjeta DAQ	No	Vídeos explicativos de apoyo tanto en Windows como Linux. Adaptación a Windows.
Práctica 2: E/S simples con la tarjeta DAQ LabJack U3-HV	No	Se ha realizado un simulador de la tarjeta.
Práctica 3: Modo streaming y contadores con la tarjeta DAQ LabJack U3-HV	Sí	
Práctica 4: Muestreo y aliasing	Sí	
Práctica 5: Conversión AD y DA	Sí	
Práctica 6: Simulación de amplificadores diferenciales y de instrumentación	No	Vídeos de apoyo para explicar el funcionamiento de LTSpice
Práctica 7: Medida de temperatura: diodo y amplificador diferencial	No	Simulación con LTSpice
Práctica 8: Medida de temperatura: termopar y amplificador de instrumentación	Parcial	Parte de la práctica se presenta en simulación. El resto se monta en el laboratorio

Para la práctica de introducción a la tarjeta DAQ LabJack U3-HV (E/S simples) se ha desarrollado un simulador. El esquema del simulador se encuentra en la figura 1, que muestra los tres archivos de Python y el fichero de datos involucrado.

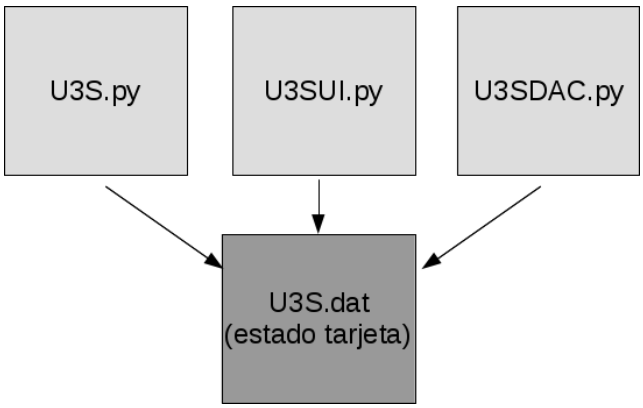


Fig. 1. Esquema de la programación del simulador de la tarjeta

La base de funcionamiento del sistema está en el acceso a un recurso compartido, el fichero u3S.dat, en el cual se guarda el estado de la tarjeta (tipo de pines y valores de entrada o salida). El módulo principal se denomina U3S.py (el software original de la tarjeta real proporcionado por el fabricante se carga en Python con el nombre U3). Desde él se ha realizado una interfaz de programación que incluye todas las funciones que se utilizan en prácticas, con los mismos nombres y tipos de datos que en la tarjeta real. Internamente se han definido clases para definir los pines y la tarjeta en sí, pero todo esto queda oculto al usuario final. Cada vez que se realiza un comando, el estado de la tarjeta se lee y se actualiza en su caso.

El módulo U3SUI sirve para visualizar gráficamente la tarjeta y se ha basado en Tkinter [7]. La idea es que está interfaz gráfica simple sustituya a la tarjeta y a lo que podría observar el estudiante en el laboratorio para E/S simples. Dependiendo de la configuración de cada pin, el aspecto de la interfaz cambia. En la figura 2 se muestra un ejemplo en el que los pines FIO7 y FIO6 están configurados como entradas analógicas. En este caso sus barras deslizantes están activas y el usuario puede moverlas. El valor puede ser leído desde una línea de comandos con el módulo U3S. Por su parte, el pin FIO5 está configurado como digital de entrada. Al estar activa la casilla, indicamos que la entrada está a 1. Finalmente, el pin FIO4 está configurado como digital de salida. Por tanto, la casilla activable no está habilitada y se muestra el valor del pin, que puede ser establecido desde una consola. El resto de pines de la tarjeta LabJack U3-HV usados en las prácticas tienen una configuración fija (FIO3-FIO0 como entradas analógicas, DAC1-0 son salidas analógicas). El acceso al fichero del estado de la tarjeta está obviamente protegido para que no puedan acceder dos módulos al mismo tiempo. Además, la programación se ha realizado para que cada módulo sólo pueda acceder a la parte que le corresponde (por ejemplo, desde la interfaz gráfica u3SUI no podremos configurar el tipo de pin, esto sólo se hace desde la línea de comandos con U3S).

Si bien las salidas analógicas son visibles en la interfaz U3SUI, también se ha realizado un módulo para que las salidas sean visibles en función del tiempo (U3SDAC). Un ejemplo se

muestra en la figura 3. Al igual que se plantea en una de las prácticas, se ha definido una función para obtener salidas analógicas sinusoidales de período y amplitud dadas. El funcionamiento es tal que la frecuencia debe ser baja (períodos mayores que 1 s). En la figura se muestra una onda de 15 s de período y amplitud 2 V.

Finalmente, otras herramientas que se utilizarán en esta planificación serán herramientas bien conocidas de simulación de circuitos. En particular se recomienda LTSpice. Se han realizado vídeos que muestran cómo realizar la simulación en LTSpice utilizando amplificadores operacionales. En el esquema de prácticas presenciales (Práctica 6), una de las prácticas era ya directamente de simulación, por lo que su paso a semi-presencial es directo.

La práctica 7 en la que se monta un medidor de temperatura basado en un diodo también es fácilmente adaptable a simulación. El esquema contiene un sistema similar a puente de resistencias, en el que una de ellas ha sido sustituida por un diodo y el otro brazo del puente sirve para ajustar la salida nula del puente. El sistema se amplifica con un amplificador diferencial. En la práctica, en primer lugar se observan y ajustan las ganancias del amplificador diferencial, tanto en modo diferencial como en modo común. El efecto del desapareamiento de las resistencias en la ganancia en modo común puede ser también simulado (resistencias de tolerancia 5% o 1%). Respecto al voltaje de offset, se puede introducir en el modelo de amplificador operacional un valor similar al del OP07, que se utiliza en las prácticas presenciales. En la segunda parte de la práctica, el puente con diodo se conecta al amplificador diferencial y el efecto en la salida de cambiar la temperatura es observado. A diferencia de otras partes de la asignatura donde se explican los pasos más en detalle, en esta práctica el estudiante debe también buscar la información en Internet sobre el modelado del cambio de temperatura en LTSpice.

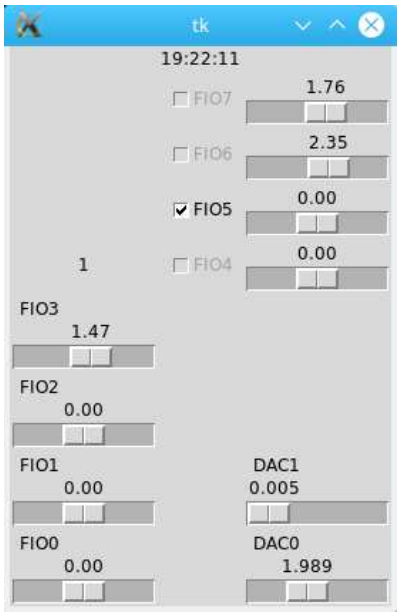


Fig. 2. Interfaz gráfica que representa esquemáticamente la tarjeta

La práctica 8 (medida de temperatura con termopar y amplificador de instrumentación) sigue un guión similar pero se dividiría en dos partes. En la primera parte se utiliza LTspice para configurar un amplificador de instrumentación comercial de una ganancia dada, y se simula el circuito para determinar la ganancia en modo común y en modo diferencial. La segunda parte es presencial, y se utiliza un amplificador de instrumentación para amplificar la señal de un termopar. Se comprueba el efecto del aumento de temperatura midiendo la temperatura de dos resistencias por las que se hace pasar una intensidad (resistencias de 0.5W y 4W).

C. Prácticas en la modalidad semipresencial semi-2

En la modalidad que denominados informalmente semi-2, se supone que el estudiante tiene equipamiento que permite realizar las prácticas en su entorno habitual sin desplazarse a la universidad.

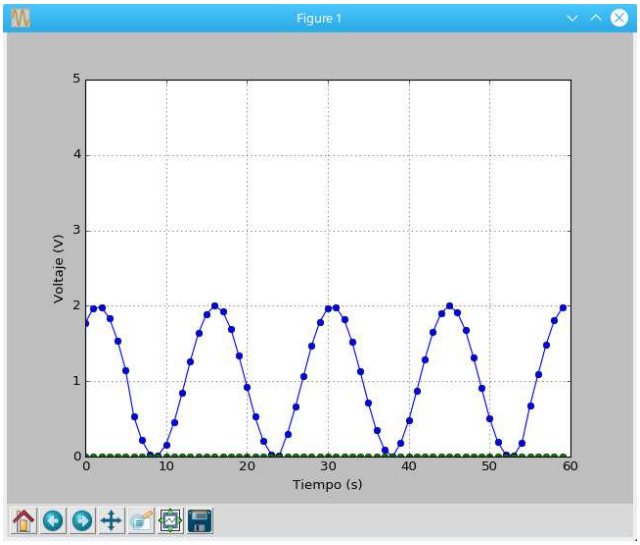


Fig. 3. Ventana que muestra las salidas analógicas de la tarjeta en función del tiempo. Ejemplo de onda sinusoidal.

La estructura de las prácticas será la misma que en formato presencial. Los retos son que el equipamiento sea lo más económico posible y que se facilite la entrega de las prácticas para verificar su realización y evaluación en su caso.

En cuanto al equipamiento, pasamos a describir una lista de equipamiento básico de laboratorio y algunos comentarios sobre él.

- Tarjeta de adquisición de datos. La tarjeta utilizada es el modelo LabJack U3-HV [4]. Si bien es cierto que su precio no es elevado para este tipo de dispositivos (unos 140 € IVA incluido), para un estudiante puede ser caro y sólo se utiliza en esta asignatura.
- Polímetro. Existen multitud de modelos de bajo coste. Es útil en multitud de prácticas en la carrera.

- Osciloscopio. Existen modelos de bajo coste para PC que se conectan a un USB. Pueden adquirirse incluso en tiendas generales como Amazon y existen modelos desde unos 80€. Muchos incluyen también entradas digitales, convirtiéndose en analizadores lógicos. Si bien sus prestaciones no son elevadas, permiten realizar gran parte de los trabajos de laboratorio de electrónica y circuitos en la carrera. Un ejemplo de modelos básicos son el Hantek6022BE, el SainSmart DDS140 o el PicoScope 2204A. El modelo de SainSmart tiene módulos para analizador lógico o generador de señales que, en conjunto, estarían por debajo de 150€ a fecha de escritura del artículo. El modelo PicoScope 2204A también posee una salida para generador de ondas. Este equipamiento también se puede reutilizar en las prácticas de la carrera.
- Generador de funciones. Este equipamiento es más difícil de encontrar a bajo precio. Aun así, por debajo de 150 € podemos encontrar algunos modelos básicos de fabricante desconocido [8] o el HPG1MK2 [9] o incluso alguno cuyos componentes se venden por separado y que es necesario soldar [10]. La opción de que estuviese integrado en el osciloscopio sería sin duda interesante para reducir el precio.
- Fuente de alimentación. La fuente de alimentación también es un equipamiento donde no se encuentra tanta variedad como en los osciloscopios, si nos centramos en equipos de bajo coste. Es difícil encontrar equipos con fuente variable, fija de +5V y alimentación bipolar ± 15 V. Para esta asignatura, una opción es adaptar una fuente de PC con conector ATX. El precio se reduce considerablemente, pudiéndose encontrar por unos 30 € [11]. La salida es de 5V y ± 12 V que para esta asignatura es suficiente y permite alimentar los amplificadores diferenciales o de instrumentación que se usan. Una desventaja es que es necesario incluir conectores para facilitar conexiones de cables a protoboard, así como la inclusión de elementos de protección.
- Otro equipamiento y componentes. El resto de equipamiento y componentes no es muy costoso. Existen innumerables páginas web tanto de aficionados a electrónica o robótica como de ventas generales donde se pueden adquirir placas de prototipado, cables y componentes electrónicos.

También se realizó una búsqueda de entrenadores completos de electrónica. Existen modelos que incluyen protoboard, alimentaciones a +5 V y bipolares, voltímetro y generador de señales y algunos otros elementos. Por su tamaño y ser un equipo compacto, serían una buena alternativa para un estudio en casa. Un ejemplo es el entrenador ETS7000 de KANDH Products [12]. Otra opción interesante es el equipo Analog Discovery 2, de National Instruments. Incluye osciloscopio, generador de ondas, voltímetro y salida ±5 ajustable, con un precio entre 300 y 400 € según accesorios.

En definitiva, por un precio estimado grosso modo de 300 € un estudiante podría tener un equipamiento de utilidad para realizar por su cuenta las prácticas de las asignaturas de Electrónica. Para la asignatura que nos ocupa, sería necesario también comprar una tarjeta DAQ, lo que eleva el coste.

Este kit mínimo es una opción interesante para el trabajo personal del estudiante. Sin embargo, hemos de decir que se ha encontrado cierta volatilidad en la información al buscar este tipo de equipamiento. Salvo los osciloscopios o los polímetros, donde hay una amplia variedad, en el resto de sistemas la oferta no es tan amplia y los productos no corresponden a los que podríamos denominar grandes fabricantes de equipos electrónicos. La información en Internet puede desaparecer o los productos descatalogarse con cierta facilidad. Así ha ocurrido con algunos de los equipos que se encontraron en un trabajo previo, en el que se hizo una estimación de los recursos necesarios para el paso a semipresencial en varias asignaturas del grado [3]. Por el contrario, como aspecto positivo, es evidente el interés creciente a nivel de aficionado en la electrónica y la explosión de tiendas de componentes y equipos en la red, por lo que se puede esperar que en el futuro próximo sea posible adquirir un kit mínimo incluso a un precio más barato.

En cuanto a la comprobación de la realización de las prácticas, se utiliza la entrega por tareas de la herramienta Moodle, que permite la subida de diferentes tipos de archivos, la realización de comentarios por parte del profesor y la evaluación en su caso. El tipo de material a entregar es el siguiente:

- Cuaderno de laboratorio escaneado (se prefiere el documento escrito a mano).
- En su caso, ficheros de simulación de circuitos (LTSpice).
- Material gráfico: imágenes y vídeos.

Se insiste en la entrega de vídeos como material para la justificación de la realización de las prácticas. En la actualidad, cualquier móvil tiene una capacidad de sobra para grabar vídeos de buena calidad. Un vídeo de 640x480, 30 fps y de duración de aproximadamente 30 s, ocupa alrededor de 10 MB y puede mostrar un montaje con entradas, salidas y colocación de componentes en la protoboards. El estudiante puede incluir la explicación de su montaje en el audio del propio vídeo. El vídeo debe mostrar el sistema completo, de forma que se pueda seguir el cableado y las conexiones. El montaje debe estar limpio y ordenado, aún con más importancia que en una práctica presencial. Las imágenes de medidas de polímetros u osciloscopios deben ser lo suficientemente nítidas para observar los valores, escalas y números de la pantalla. En la figura 4 se muestran varias imágenes de un ejemplo de vídeo para comprobar la ganancia de un sistema de amplificación.

La comprobación de las prácticas se podría ampliar con cuestiones de autoevaluación en Moodle.

IV. APLICACIÓN A LA DOCENCIA PRESENCIAL

La filosofía del trabajo de preparación de la opción semipresencial es también hacer una revisión del material usado en presencial y poder aplicar parte del material generado en dicha docencia. En particular, se han empezado a usar los siguientes recursos:

- Vídeos docentes explicativos sobre varias herramientas informáticas: Linux/Python y LTSpice. Tienen aplicación directa en la docencia presencial ya que corresponden a las explicaciones que tradicionalmente hacía el profesor en el laboratorio. Los estudiantes tienen el material disponible con antelación si desean adelantar trabajo.

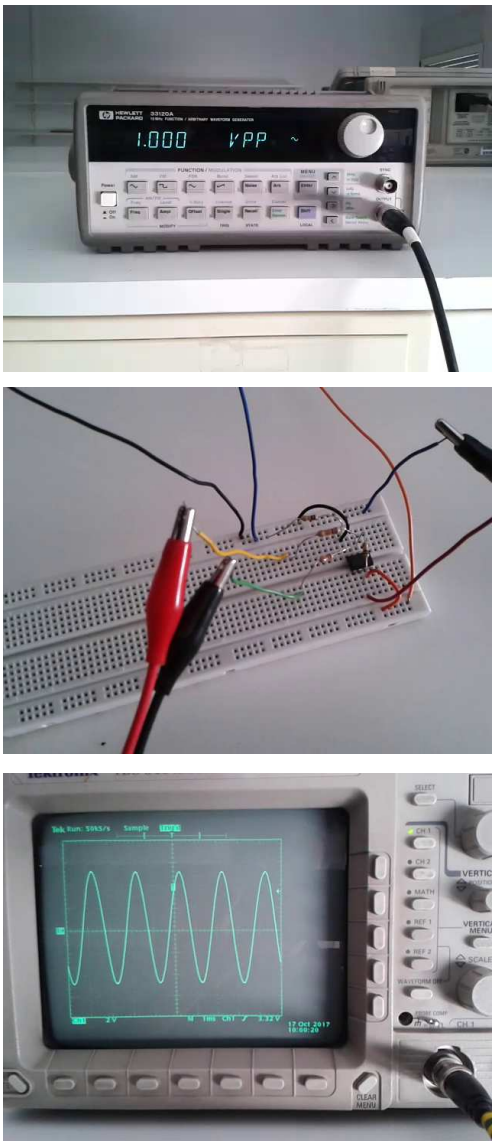


Fig. 4. Serie de imágenes pertenecientes a un vídeo para mostrar la medida de la ganancia de una etapa: de arriba a abajo, entrada en el generador de señales, montaje y salida en el osciloscopio.

- Entrega de prácticas acompañada de material multimedia (fotos, vídeos). Se va a ensayar la evaluación de algunas prácticas presenciales de esta manera de forma preliminar. En principio, puede permitir que el docente disponga de algo más de tiempo para comprobar los montajes a posteriori. Sin embargo, para los alumnos es una carga adicional y hay que valorar como lo aceptarán.
- Si bien en este artículo se ha considerado la parte práctica, también se ha elaborado material para la parte teórica que se cita brevemente. Además de las transparencias tradicionales que se dejaban accesibles en Moodle, cada tema está acompañado de unas cuestiones de autoevaluación, para comprobar la comprensión y la lectura de la teoría. En la mayor parte de las ocasiones se trata de cuestiones cortas y breves. Para algunos temas, se han elaborado también vídeos explicativos de la teoría, acompañados de cálculos a mano con una tableta digitalizadora, en sustitución de la pizarra. Se va a realizar una prueba piloto de enseñanza en algunos temas con el método de clase invertida [14], para analizar la respuesta de los alumnos presenciales ante los vídeos, mientras que la clase presencial se centrará en dudas de los alumnos y resolución de cuestiones de autoevaluación y problemas.

En el futuro, se informará también a los alumnos de la posibilidad de la adquisición de material de bajo coste para realizar numerosas prácticas del ámbito de la Electrónica fuera de la universidad.

V. CONCLUSIONES, OPORTUNIDADES Y TRABAJO FUTURO

En este artículo se han presentado los primeros pasos de un trabajo en curso de adaptación a la opción de semipresencial de las prácticas de Instrumentación Electrónica del Grado de Ingeniería Electrónica y Automática. La implantación sería curso a curso. Dado que la asignatura está en tercero, su implantación sería, como pronto, en el curso 20/21, dependiendo de varios trámites administrativos.

Tomando como base las prácticas actuales, se han elaborado guiones y material para realizar parte del trabajo mediante simulación, reduciendo la asistencia presencial. En la realización de este trabajo se pensó también en la opción de que los estudiantes semipresenciales pudiesen tener equipamiento básico de laboratorio para realizar las prácticas físicamente y en la entrega de material a través de Moodle para verificar la realización del trabajo.

La intención de los autores es que se pueda mejorar también la enseñanza presencial. El proceso de reflexión y búsqueda de información ha sido muy satisfactorio, por ejemplo, al actualizarnos sobre información de equipamiento de bajo coste para el laboratorio. La realización de vídeos docentes también puede ser de gran utilidad en enseñanza

presencial, al menos para la explicación de programas informáticos y simuladores.

Un inconveniente en la preparación de materiales para la docencia semipresencial es la gran cantidad de tiempo que se le dedica a la preparación de materiales específicos. A día de hoy, el reconocimiento oficial de este trabajo es incierto. Este problema se intentar paliar aprovechando el trabajo en la docencia presencial, como ya se ha comentado.

El trabajo presenta evidentes limitaciones. Al ser un trabajo preliminar no podemos presentar datos sobre estudiantes semipresenciales reales. En la medida de lo posible, se harán pruebas piloto de los materiales y métodos de trabajo con los estudiantes presenciales para evaluarlos y mejorarlos hasta el lanzamiento de la asignatura. Otro posible inconveniente, pensando en el kit de laboratorio de bajo coste para la carrera, es el elevado precio de la tarjeta DAQ U3-HV en comparación con su uso, ya que sería la única asignatura donde se utilizaría. Podrían explorarse otras opciones más baratas, por ejemplo utilizar un Arduino. El problema es que su uso como tarjeta DAQ no es trivial, especialmente en la programación del modo streaming. En búsquedas preliminares, no hemos podido encontrar proyectos en este sentido, lo cual obligaría a considerar la propia programación por parte de los autores. Como ventaja, tendríamos su bajo coste, la gran cantidad de información que incluye tanto la parte hardware como la visualización utilizando el lenguaje Processing [15], así como el posible uso en asignaturas relacionadas con microcontroladores.

A la hora de abordar este proyecto, también se realizó una búsqueda de software y hardware libre relacionados con instrumentación [16]. Existen iniciativas interesantes como MyOpenLab [17]. Se trata de un software de libre distribución bajo licencia GNU de código abierto, escrito en Java. Permite realizar aplicaciones de modelado y simulación. Cuenta con la posibilidad de conectar hardware, entre ellos Arduino, y sigue la misma filosofía de programación que LabView. Si bien es un proyecto muy interesante, atractivo visualmente y con una amplia biblioteca de funciones, en algunos aspectos es mejorable. Existe una información limitada, se han encontrado problemas de instalación en algunas versiones, limitaciones temporales a señales (resolución temporal de 1 ms) y otros errores en el funcionamiento [16]. La opción de Arduino y Processing, o Arduino con Licencias de estudiante de National Instruments podría ser otra opción [16].

Con referencia al trabajo por realizar antes del lanzamiento de la modalidad semipresencial, se puede sintetizar en estos puntos:

- Se va a realizar una evaluación previa de parte del material generado con los alumnos presenciales. Esto permitiría mejorarlos y realizar una segunda versión. Se evaluarán el uso de entregables de las prácticas con material multimedia y los vídeos de apoyo en las clases teóricas y prácticas (explicación de LTSpice, control de la tarjeta desde Python).
- También se pretende incluir en las prácticas cuestiones de autoevaluación múltiple: preguntas de opción múltiple o de cálculo numérico generadas aleatoriamente en Moodle. El tiempo dedicado debería ser breve, 10 min, con preguntas de cada práctica específica. La evaluación se seguirá con el libro de Calificaciones.
- La interfaz gráfica del simulador de la tarjeta es mejorable en su estilo y estética. De momento se ha utilizado una librería gráfica sencilla como prueba de concepto.
- Se continuará la búsqueda de equipamiento de bajo coste de laboratorio en coordinación con la preparación de otras asignaturas. Esto permitiría definir por completo un kit básico para trabajo autónomo del alumno sin acudir a la universidad, si es posible con varias opciones “estables” en cada tipo de equipamiento.
- En relación con el punto anterior, si bien la posibilidad de que el alumno realice por su cuenta todas las prácticas es muy atractiva (modalidad semi-2), hay que debatir todavía si la evaluación debería incluir una prueba de laboratorio presencial y de qué alcance. Garantizar la autoría cuando el estudiante no está presente es un problema abierto, que puede compensarse con la prueba de laboratorio y la exigencia de notas mínimas en los exámenes escritos.
- Asimismo, es necesario seguir realizando una búsqueda de hardware y software libre en instrumentación, que podría facilitar aún más la labor de adaptación.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha estado financiado parcialmente por el proyecto de innovación docente PIIDUZ_17_182 titulado “Adaptación de las prácticas de la asignatura de Instrumentación Electrónica en el grado en Ingeniería Electrónica y Automática a la modalidad semipresencial utilizando Moodle para su gestión y evaluación”, de la Universidad de Zaragoza.

REFERENCIAS

[1] N. Kalberer, R. Kurz, C. Bohmer, E. Beck-Meutz, “Implementation of E-learning in an Electrical Engineering Study Program,” 2016 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), pp. 355-360.

[2] M. Stroß, G. Kugler, A. Schibelbein, N. Feldmann, C. Bohmer, E. Beck-Meutz, “Lecturer’s Views on E-Learning in an Engineering Study Program for Non-traditional Students,” 2017 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), pp. 453-457.

[3] R. Aragues, E. Gil, R. Igual, C. Medrano, J. Delgado, S. Albiol, F. Romero, J.C. García, R. Pérez, “Blended Learning in Electronics and Automation Engineering: a Study of Software and Hardware Needs for Practical Teaching,” EDULEARN 2017 Proceedings, pp. 274-283, 2017.

[4] Tarjeta DAQ Labjack U3-HV, https://labjack.com/products/u3, última visita en febrero de 2018.

[5] Anaconda: http://www.anaconda.com, última visita en febrero de 2018.

[6] Portalocker, https://pypi.python.org/pypi/portalocker, última visita en febrero de 2018.

[7] Tkinter, https://docs.python.org/2/library/tkinter.html, última visita en febrero de 2018.

[8] Generador de señal Función digital de alta precisión de doble canal DDS, https://www.cafago.com/es/p-e0820-6.html, última visita en febrero de 2018.

[9] Generador de funciones de bolsillo HPG1MK2, https://www.velleman.eu/products/view/?id=437582, última visita en febrero de 2018.

[10] Kit generador de funciones FG085, http://tienda.bricogeek.com/kits-electronica-para-montar/582-kit-generador-de-funciones-fg085.html, última visita en febrero de 2018.

[11] Fuente de PC ATX EPS 12, https://www.cablematic.es/mobile/product.html?ref=FA56, última visita en febrero de 2018.

[12] Entrenador analógico/digital ETS 7000, http://www.kandh.com.tw/es/products_2.php?prod=120, última visita en febrero de 2018.

[13] Analog Discoery 2, National Instruments, https://www.ni.com/es-es/shop/select/analog-discovery-2, última visita en abril de 2018.

[14] A. Karabulut-Ilgu, N. Jaramillo Cherrez and Charles T. Jahren, "A systematic review of research on the flipped learning mathod in engineering education," British Journal of Educational Technology, 2017.

[15] Processing, https://processing.org, última visita en febrero de 2018.

[16] Eva Pardos Canales, Sistemas de adquisición de datos basados en hardware y software libre, Trabajo Fin de Grado, Grado en Ingeniería Electrónica y Automática, EINA, Universidad de Zaragoza, septiembre de 2017.

[17] MyOpenLab, https://myopenlab.es, última visita en febrero de 2018.

Electrical machine course teaching reform in the background of new engineering construction

Guoliang Yang, YingXiao ,Yuepeng Wang
Electrical engineering and automation department of Electrical engineering college
Yanshan University
Qinhuangdao, China ,066004
y99ygl@ysu.edu.cn

***Abstract*— “ Electrical Machinery ” is the electrical engineering professional basic subject featured with theory and abstract content, involving many disciplines, and closely linked with the engineering practice, which makes it hard in the teaching and learning process. In the background of the fourth industrial revolution and new engineering construction, the teaching reform of Electrical Machinery courses should be carried out to improve the talent training quality and adapt to the new economic development of science and technology. Taking Yanshan University as an example, this paper elaborates the design plan of the teaching reform, the organization and selection of teaching contents, the reform of classroom teaching method and the practice and effect of project teaching. Through practice, compared with before the teaching reform, students' interest in learning, innovation ability, and practical ability have been significantly improved.**

Keywords—Motor; teaching reform; new engineering construction; personnel training; teaching practice;

I. INTRODUCTION

On June 2, 2016, China became a full member of the 18th "Washington Accord." This indicates that the quality of engineering education in our country is internationally recognized and the internationalization of engineering education has taken an important step forward. In March 2016, the Yanshan University professional certification organization, one of the two expeditions designated by the Ministry of Education, was highly appraised by the secretariat of the Washington Accord. Being a landmark breakthrough in the "Washington Accord" will strongly promote the international advanced concepts and quality standards of higher engineering education in China, deepen the reform of engineering education and teaching, improve the quality of personnel training, and effectively promote the exchange and cooperation between engineering education and international engineering education in China Cooperation [1]

Under the new situation in which the knowledge economy, the new round of science and technology and the industrial revolution are thriving, the fourth industrial revolution has arrived and the traditional higher engineering education in our country, to a large extent, can no longer meet and lead the development needs of the new economy There is an urgent need to adopt new technologies to build and develop a number of emerging engineering departments or to upgrade and upgrade a number of traditional engineering courses.

Under this background, as a specialized subject teacher, based on the responsibility of cultivating innovative talents for the national economic restructuring and social development, the teaching reform on the electrical machinery courses taught is discussed.

Based on the teaching of motor course in Yanshan University from China, the paper discusses the design of teaching reform in motor science course. The emphasis is put on the practice and effect of project teaching in detail. It changes the traditional teaching methods of motor courses, takes the active participation of students as the main body, guided by project Teaching, using a variety of teaching methods and strategies, and achieved good teaching results.

II. WORK DESCRIPTION

A. Characteristics of Electrical Machinery Courses and Traditional Teaching Methods

"Electrical Machinery " is an important professional basic course in electrical engineering and automation. Through the learning of this course, students can acquire the basic theory, basic knowledge and basic skills of the motor, prepare themselves for the study of specialized courses and lay a theoretical foundation for the relevant professional work in the future. "Motor" is one of the professional foundations. It is recognized by domestic and foreign counterparts as a hard-to-learn course [2]. It mainly discusses four typical parts of electrician course including transformers, induction motors, DC motors and synchronous motors. This involves complex motor body space structures, operating principle characteristics, and magnetic fields and nonlinear ferromagnetic materials in the motor's internal current distribution space. Some students call it a "bible," which to some extent reflects its difficulties.

Before studying "Electrical Machinery ", students learned advanced theoretical courses in mathematics and physics. However, in the practice of various equipment-specific electrical engineering used in electrical engineering, students had little chance of observing the internal structure of the motor. The electromagnetic field of the motor was invisible. All of these factors make it difficult for students to learn this course.

This project is supported by Yanshan University teaching reform program.

For this professional foundation course, in the previous teaching process, mainly in the classroom teaching, the teacher explained the theoretical knowledge in the class, but students received little learning effect, Figure 1 is a 2015 student performance chart , The result distribution is not ideal. This problem had been bothered us. The author and other members of the motor teaching team always adhere to the "student-oriented", continue to explore new teaching methods, deepen the teaching reform, and vigorously improve the quality of teaching. In the new industrial construction background, the teaching team members decided to change the previous teaching concepts, with CDIO as the teaching philosophy, project-led teaching as the lead, the new " Electrical Machinery " teaching reform. This work has received the support of Yanshan University teaching reform project funds, and some achievements have been acquired.

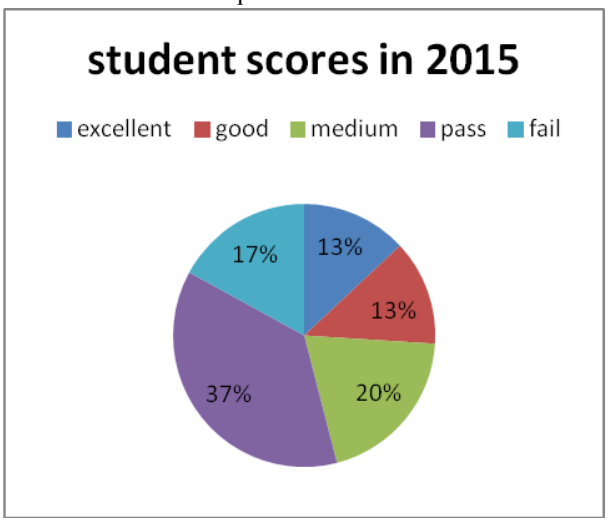


Fig. 1 student scores chart in 2015

B. "Electrical Machinery " Teaching Reform Design

1) Teaching content reform

As the content of this course is more difficult for the students, it is necessary to understand the profound theories in simple language in order to comprehend them. However, due to the more content and lack of time, it is impossible to complete the book within a limited period of time. Therefore, the teaching content reform is required.

Students not only need to master the basic theory, but also need to solve the actual engineering problems. In order to make students willing to learn this course, teachers organize teaching content should be cautious. Learning the motor course, the use of electromagnetics to analyze the motor principle is necessary, so the teaching content must first electromagnetism related to basic theory to be taught to students, which will make it easier for students to learn the course. Transformers, synchronous machines, asynchronous machines and DC motors are ultimately energy conversion components. In a sense, it can also be called an electromagnetic component. Therefore, the teacher needs more attention in the teaching of electromagnetic induction motor.

In learning these four typical motor process, understand their structure is the basis, on this basis, to clarify the relationship between the electromagnetic induction motor. Our approach is to reduce motor lectures in classroom lectures, the combination of project-based teaching and video playback to complete this part of this way of understanding in real life than in the classroom to explain their own imagination is much better.

In the teaching content, each kind of electrical machinery has its own characteristic and there are many differences among them, but each electrical machinery also has a lot of things in common. Identifying differences and similarities between motors for comparative teaching is helpful for students to gain a deeper understanding of this course and for easy access to the course, for example, to compare the operating characteristics of all motors. Let students be interested in the motor, the esoteric "motor" is no longer esoteric, "Bible" is no longer "Bible."

Increase project-based teaching content.

2) Reform of classroom teaching methods

In order to improve teaching effectiveness, various measures need to be used at the same time. In order to improve students' initiative, we have chosen a gradual and orderly teaching mode, which makes students become the main body of classroom teaching activities and change the former teacher's "one-word" situation.

a). Attract students' attention

In the process of classroom teaching, teachers should change the teaching concept, make the students become the main body of classroom teaching activities, improve students 'learning initiative and increase students' interest in learning.

As mentioned above, "motor" course has a strong theoretical, involving real machinery and equipment. First, teachers should make students aware that motors have been applied to all aspects of our lives, such as aerospace, defense construction, power systems, manufacturing, and everyday life. In the process of learning each motor, the first step is to enable students to understand the application of the motor, the development history and research status quo. Then lead the students to answer the following questions: What is a similar device? What are the advantages and disadvantages? Where is the development space? Make students understand that learning electrical knowledge is useful, but there are still some problems that need them to explore and solve, students' interest and enthusiasm can be naturally excited [3].

In the implementation of teaching content, improve students' attention and guide students to think, you can ask questions, so that students can learn and explore these issues. During the learning process, students can ask questions and discuss. In our teaching practice, the key to teachers is guidance. The teaching content is almost completely understood by the students under the guidance of teachers. For example, when discussing the electromagnetism of some motors, students already know that current flowing through a winding creates a magnetic field and that an alternating magnetic field through the winding senses electromotive force. Based on this theory, teachers can lead students to analyze the induction process of the motor itself, and then guide them to write out the basic equations of the motor by using the basic circuit principle, from which they can draw the phasor diagram and equivalent circuit.

b) Some teaching tools application

When it comes to the motors involved, we play a video of how the motor is being manufactured in the factory. By

watching the video in class, students can visually understand the structure of the motor, the assembly process and its applications.

A difficult problem in the teaching process is the magnetic field distribution in the motor, because the magnetic field in the motor distribution is invisible, students feel more difficult to understand in learning. With the help of electromagnetic field analysis software, the flux can be calculated and the lines of force can then be displayed in a color chart and cloud chart. At the same time, teachers can encourage students to learn the relevant software and simulate the magnetic fields of some simple motors.

Another difficulty of "motor" is the structure and pulsation of AC motor windings, and the principle of rotating magnetic field produced by AC windings. For this part, teachers use the corresponding Flash courseware to produce the corresponding process of winding connection, the magnetic field generated by the winding process. In addition the working principle of the transformer Flash, Sightseeing elevator company case of Osma Elevator Co., Ltd. is also a good lesson for students to demonstrate.

In a word, in order to improve the teaching effect, teachers can flexibly adopt various teaching methods and tools so that students can feel the learning process not only useful but also interesting.

3) Project - based teaching design and implementation

Beginning with the spring semester of 2017, motor course project teaching will be conducted. The teaching team first developed a project-based teaching program and project teaching manuals. The project manual is divided into eleven parts: Project Overview, Project Objectives, Main Contents, Project Process Arrangements, Basic Requirements, Assessment Methods, Research Project Report Requirements, Team Group Descriptions, Requirements for Learner Presentation, Reference Sources, and Grading Rules.

a). Main Contents

This course includes a three-level project around AC motors and DC motors. It covers the structure, working principle, magnetic field distribution and operation characteristics of AC motors and DC motors. There are totally eight project topics.

In the form of groupings, students select one of the project topics as a group and work around the topics selected: each team first participates in the disassembly of the DC motor (or AC motor) and grasps the DC motor (or AC motor) Structure; using spare time to find, read and analyze the relevant knowledge content, to develop a workable program different from his group; summarize, organize and write the project report, made of PPT; each team to participate in the defense, the statement time 5-8 minutes , And finally by the respondent teacher to ask questions, the total defense time is not more than 10 minutes; each team submits a PPT electronic version, a project report of the electronic version and paper version. The details are as follows:

(1) DC motor structure and four quadrant operation characteristics analysis

To disassemble and install the DC motor, master the structure of the DC motor and the composition of the winding, analyze the basic working principle of the DC motor, analyze the working magnetic field of the DC motor, analyze the starting characteristics, speed regulation characteristics and braking characteristics of the DC motor.

(2) of the asynchronous motor structure and four-quadrant operation characteristics analysis

Disassemble and install the squirrel cage induction motor, grasp the structure of the squirrel cage induction motor and the composition of the winding, analyze the basic working principle of the asynchronous motor, analyze the rotating magnetic field of the asynchronous motor, analyze the starting characteristic, speed regulation characteristic And braking characteristics.

b). Project process arrangement

Timing: The course starts on the first week and ends on the thirteenth week.

Project Location: Disassembly experiment for the C-floor motor drag laboratory, project respondent set at 13 weeks. Table 1 shows the contents and time planning of the project.

TABLE I. PROJECT CONTENT AND SCHEDULE

course	**Schedule**	Main Contents	**Remarks**
Electrical Machinery	Stage1	AC motor and DC motor disassembly	4 hours
	Stage2	Find information, discussion, program demonstration, write a project report	6 hours
	Stage3	Project Summary and PPT Defense	2 hours

c) Assessment method

The instructor comprehensively evaluates the performance of each group of students based on student attendance, motor disassembly and assembly, research reports, and PPT responses. During the project, teachers can grade each student according to attendance and performance of individual, and add or subtract points on the basis of the average score of each group.

d) Team group situation

Every 4 to 5 students as a group, cooperate with each other to complete the dismantling of the motor, the project theme information to find, discuss, determine the program, writing papers and PPT speech defense. Each team should indicate in the project report each person's contribution to the overall work and the proportion of work, the proportion can not be equally divided. The extent and depth of the research will affect the final grade of each group, encourage students to choose their own course of interest for innovative design and in-depth study.

e) Lecture presentation report

All the discussion topics should be based on the prescribed time on the teacher and all students took the stage to report. The main purpose of the presentation is to let the teacher and other students understand your main content and work. The group's classmates must all report before the stage, appoint the main report reporter before reporting. Presentation time of each case is no more than 5 minutes, and there are 5 minutes to discuss the time. Each group must strictly control the presentation time. Every student should practice well in advance to avoid overtime. The presentation PPT document

should clearly state the topics for discussion and research, a brief introduction to the topics to be discussed, the main contents, conclusions and conclusions. Figure 2 shows the project-- based teaching site pictures.







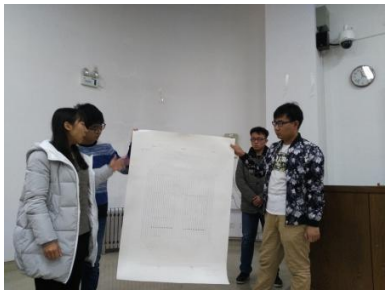


Fig.2 Project-- based teaching site picture

C .Electrical Machinery Course Teaching Reform Course Performance Evaluation and Effect

In order to stimulate students' motivation to learn, teachers need to pay more attention to process evaluation. The total score of the course consists of five parts. Assign different weights to each section and calculate them so that the student's grades are fair and reasonable. The course score grading principle is shown in Table 2. In project teaching, plagiarism and plagiarism found in the research project results will be zero.

TABLE II. COURSE SCORE GRADING PRINCIPLE

Serial number	Assessment items	Evaluation Standards	Remarks
1	Classroom performance (10points）	Attendance, Class Participation, Class Exercises, and Class Tests	
2	school assignment (10points）	According to job completion	
3	Experimental results (10points）	The laboratory teacher gives the experimental result according to the experimental situation, including experimental design and organization, experimental wiring and operation, experimental data processing and experiment report.	
4	Course research project (20points）	The project result consists of 3 parts: (1) The first part, motor disassembly experiment, 5 points; (2) the second part, the motor characteristics of the project report, 10 points; (3) The third part, project evaluation and defense. PPT file submitted during the defense, and the use of PPT to assess the contents of the project and defense, 5 points.	During the project, teachers can be based on individual attendance and performance, each student scoring, in each group based on the average score of individual scores plus or minus points。
5	Written test scores (50points）	Calculated based on the actual score of the paper.	

As shown in Figure 3, the results of the course in 2017 are excellent 20%, good 36%, medium 30%, pass 10% and fail 4%. Visible results basically in line with the normal distribution, compared to Figure 1, the 2015 statistics, to be much more reasonable. Figure 4 shows the comparisons of the results of this course in recent years. It can be seen that after the project-based teaching reform started in spring 2017, the grades of 2017 have undergone great changes. The excellent rate, good rate and medium rate are obvious Promotion, passing rate and failing rate have dropped significantly, basically in line with the normal distribution. This shows that the project-based teaching reform has raised students' interest in this course, from passive learning to active learning. This course is no longer a "bible". It shows that the project-based teaching method is in line with the characteristics of the post-

95 students and the project-based teaching reform has achieved some success.

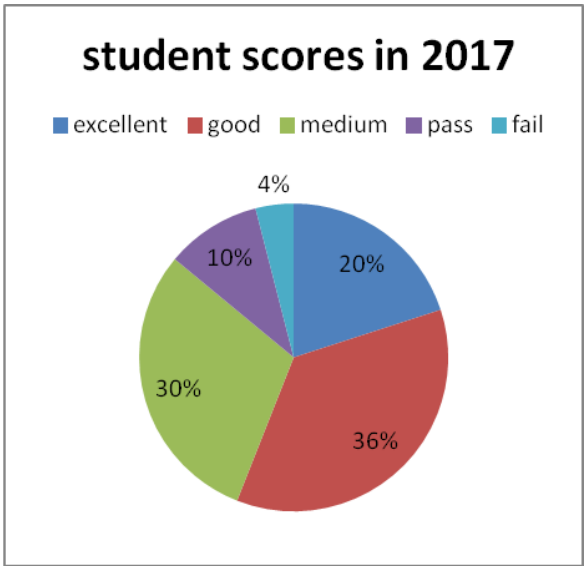


Fig. 3 2017 student scores chart

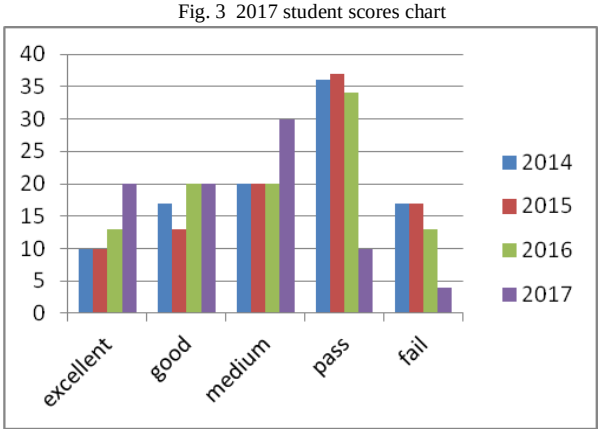


Fig. 4 Comparison of course scores in recent years

III. RESULTS ACHIEVED AND PROBLEMS ENCOUNTERED

Based on the teaching of motor course in Yanshan University, this paper introduces the characteristics and the traditional teaching methods of the motor course, and discusses in detail the teaching reform design scheme, the organization and choice of the teaching content, the reform of the classroom teaching method in order to attract the students Attention, from the previous passive access to the present active participation. It mainly introduces the practice and effect of project-based teaching in detail, changes the traditional teaching methods of motor courses, takes the active participation of students as the main body, takes the project-based teaching as the guide, and uses a variety of teaching methods and strategies to obtain good teaching effect. It has cultivated students' autonomous learning ability, innovation ability and practical ability to solve practical problems, and played a certain role in personnel training under the background of new engineering.

Project-based teaching has changed the traditional teaching methods of motor courses and achieved good teaching results. Students develop their own abilities.The shortage is that the student lesson planning time is not enough, may exceed the school's planned time,the other is that the students in each group ,some one paid more, learned well, and some paid less, it is not easy to judge.

Acknowledgment

This project is supported by Yanshan University teaching reform program.

references

[1] Qu Zhenyuan: "to promote higher engineering education to a higher level", "Higher Engineering Education Research", 2017 first period.

[2] Gregor Verbi，Chanaka Keerthisinghe, Archie C. “Chapman.Project-Based Cooperative Approach to Teaching Sustainable Energy Systems”,IEEE Transactions On Education， Vol. 60, No. 3, August 2017.

[3] Anthony A. Maciejewski et al. “A Holistic Approach to Transforming Undergraduate Electrical Engineering Education”， IEEE Access On Innovations In Electrical And Computer Engineering Education,June ,Volume 5, 2017

Programación de interfaces naturales mediante la combinación de sensores de teléfonos móviles

Javier Hernández-Aceituno
Dpto. Ingeniería Informática y de Sistemas
Universidad de La Laguna
San Cristóbal de La Laguna, España
jhernaac@ull.edu.es

Isabel Sánchez-Berriel
Dpto. Ingeniería Informática y de Sistemas
Universidad de La Laguna
San Cristóbal de La Laguna, España
isanchez@ull.edu.es

***Abstract*—Uno de los aspectos más llamativos del aprendizaje de la programación, orientada a la creación de aplicaciones para teléfonos móviles, es la posibilidad de producir interfaces basadas en movimientos y habilidades básicas del cuerpo humano, en lugar de verse limitadas al uso de teclados y ratones. En este trabajo se describe una serie de actividades prácticas, planteadas para dotar a los alumnos de las capacidades necesarias para el acceso y procesamiento de la información, proveniente de los sensores de los teléfonos móviles, y su combinación para la creación de interfaces naturales.**

***Index Terms*—Interfaces inteligentes, interfaces naturales, teléfonos móviles, programación, sensores.**

I. Introducción

Uno de los objetivos prioritarios en el diseño de aplicaciones informáticas, especialmente aquellas orientadas a funcionar principalmente en plataforma móviles tales como tablets o smartphones, es el uso de interfaces que no se encuentren limitadas a los métodos convencionales de interacción con el usuario, como pueden ser el teclado o el ratón de un ordenador.

Se denomina *interfaz natural* a toda aquella que permite interactuar con un sistema o aplicación mediante el uso de movimientos gestuales y capacidades básicas humanas, tales como la mirada o la voz, de una forma que resulte sencilla y cómoda al usuario, sin que requiera entrenamiento alguno. El uso de este tipo de interfaces ha sido ampliamente estudiado y aplicado a diversos ámbitos de estudio [1]–[4].

El interés en el desarrollo de este tipo de interfaces encuentra motivación en la gran cantidad de sensores de que disponen los dispositivos móviles, tales como giróscopos, acelerómetros, posicionamiento global, cámaras y micrófonos, y en las facilidades que los lenguajes de programación modernos dan para su uso integrado en cualquier tipo de aplicación.

Es por tanto de gran interés formar a los estudiantes universitarios de carreras basadas en la informática, para que sean capaces de utilizar las herramientas de desarrollo que se encuentran a su disposición y les permiten crear aplicaciones informáticas con interfaces naturales.

En la actualidad existe una tendencia al uso de interfaces naturales como soporte para la docencia, especialmente en casos en los que los métodos tradicionales no están disponibles o no son efectivos. La Facultad de Telemática de la Universidad de Colima (México) ha desarrollado interfaces gestuales y tangibles para educación especial y la activación física de niños de primaria [5]. También en la Universidad de Zaragoza ha elaborado un sistema de detección visual para educación infantil, basado en el reconocimiento de formas y colores mediante una cámara [6]. La Universidad de La Coruña ha realizado un estudio analizando posibles diseños para utilizar realidad aumentada como interfaz de aprendizaje [7].

El presente trabajo se enmarca dentro de la asignatura cuatrimestral “Interfaces Inteligentes”, perteneciente al itinerario de Computación del Grado en Ingeniería Informática de la Universidad de La Laguna. En esta asignatura se imparten los fundamentos y tecnologías para el análisis y diseño de experiencias interactivas, realidad virtual, realidad aumentada e interfaces naturales, organizados en los siguientes epígrafes:

1) Fundamentos y tecnologías en el análisis y diseño de experiencias interactivas
2) Realidad virtual y realidad aumentada
3) Interfaces naturales
4) Interacción afectiva y emocional

Las competencias que sus alumnos adquieren tras su estudio son las siguientes:

- Competencias generales

  CG4 Capacidad para definir, evaluar y seleccionar plataformas hardware y software para el desarrollo y la ejecución de sistemas, servicios y aplicaciones informáticas.

  CG6 Capacidad para concebir y desarrollar sistemas o arquitecturas informáticas centralizadas o distribuidas integrando hardware, software y redes.

  CG9 Capacidad para resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, autonomía y creatividad. Capacidad para saber comunicar y transmitir los conocimientos, habilidades y destrezas de la profesión de Ingeniero Técnico en Informática.

- Competencias específica del itinerario

  C44 Capacidad para desarrollar y evaluar sistemas interactivos y de presentación de información compleja y su aplicación a la resolución de problemas de diseño de interacción persona computadora.

- Competencias transversales

T7 Capacidad de comunicación efectiva (en expresión y comprensión) oral y escrita, con especial énfasis en la redacción de documentación técnica.
T10 Capacidad de integrarse rápidamente y trabajar eficientemente en equipos unidisciplinares y de colaborar en un entorno multidisciplinar.
T21 Capacidad para el razonamiento crítico, lógico y matemático.
T23 Capacidad de abstracción: capacidad de crear y utilizar modelos que reflejen situaciones reales.

Al ser eminentemente práctica, la evaluación de la asignatura de "Interfaces Inteligentes" se basa en trabajos individuales realizados semanalmente en el laboratorio y en el desarrollo grupal de dos prototipos, uno de realidad virtual y otro de alguna de las restantes técnicas explicadas durante el curso.

Se ha de resaltar que la asignatura de Interfaces Inteligentes no versa sobre el funcionamiento físico de los sensores de los dispositivos móviles, sino solamente sobre su uso en la programación de aplicaciones con interfaces naturales. Sin embargo, la Universidad de La Laguna ofrece en su Grado de Ingeniería Informática otras asignaturas, tales como Robótica Computacional [8], a través de las cuales los alumnos pueden complementar su formación con una explicación detallada a nivel de hardware sobre el funcionamiento interno de los dispositivos sensoriales.

A. Evaluación

La importancia de las prácticas en la asignatura queda reflejeda en las estrategias seguidas para la evaluación. En cada sesión práctica de laboratorio se programa una actividad que conlleva el desarrollo de una aplicación con funcionalidades mínimas, en la que se ponga en práctica el aspecto específico que se trabaje en ella. De esta forma, las prácticas se pueden agrupar en alguna de las categorías siguientes:

- Aprendizaje de programación de gráficos 3D utilizando Unity
- Desarrollo de aplicaciones utilizando los sensores:
  - Desarrollo de aplicaciones de RV
  - Desarrollo de aplicaciones de RA
  - Desarrollo de aplicaciones con interacción basada en sensores

Cada semana se evalúan las tareas que debe resolver el alumno, suponiendo un 50% de la nota de la asignatura. Además todas las técnicas y tecnologías aprendidas se deben poner en práctica en el desarrollo de un prototipo de una aplicación de RV. El tema del prototipo es libre y, si bien los alumnos por lo general optan por el desarrollo de algún videojuego, en ocasiones también han optado por simulaciones inmersivas, como es el caso de una "simulación espacial de minería con agentes reactivos" (curso 2017–2018). También se les pide que la aplicación incorpore alguno de los sensores adicionales para la interacción, como puede ser el acelerómetro o el micrófono, por ejemplo.

Todos estos trabajos son realizados por equipos de a lo sumo 3 personas, por lo que se le hace especial hincapié en el uso de herramientas colaborativas para el desarrollo de proyectos. Este aspecto es especialmente importante en el desarrollo de la competencia T10, que consideramos fundamental en el trabajo cotidiano de cualquier Graduado en Ingeniería Informática. Por otra parte, desde el punto de vista del profesor facilita la evaluación ya que permite hacer un seguimiento de las aportaciones de cada miembro del grupo.

Si bien no se restringe la herramienta a utilizar, se recomienda el uso de *Git* y la plataforma *Github* además de *Collaborate*, la herramienta que provee Unity para el desarrollo colaborativo. Independientemente de qué herramienta decida utilizar el equipo para el trabajo colaborativo, todos los prototipos deben entregarse mediante un enlace a Github que contenga todo el código del proyecto y un documento en el que se debe incluir:

- Los hitos logrados
- Los problemas y dificultades encontrados en el proyecto, tanto los que se resolvieron como aquellos que se debieron simplificar por escapar de lo factible
- Acta de acuerdos del grupo y seguimiento del proyecto

La puntuación obtenida en el desarrollo de este prototipo supone un 20% de la nota de la asignatura, y la exposición del proyecto otro 20%.

II. Métodos

Las clases prácticas de esta asignatura se basan en el desarrollo de aplicaciones en Unity3D [9], utilizando el lenguaje C#, generalmente para su ejecución en teléfonos móviles con sistema operativo Android. Tras una iniciación a la implementación de código en Unity3D, los alumnos son introducidos semanalmente a diferentes herramientas de acceso y procesamiento de la información proveniente de los sensores de un teléfono móvil, y su combinación para la generación de interfaces naturales.

En general no se impone a los alumnos una descripción estricta de qué aplicación deben programar en cada caso, sino que se les da libertad para utilizar la información obtenida de forma creativa, creando aplicaciones personalizadas sujetas sólo a un conjunto reducido de requisitos, relativos al uso de los diferentes sensores.

A. Realidad virtual

Como primera práctica, los alumnos se familiarizan con el paquete de realidad virtual de Google Cardboard [10]. Haciendo uso de los acelerómetros de un teléfono móvil, montado en una estructura de cartón, es posible crear unas gafas de realidad virtual de coste muy reducido y sencillas de programar (Fig. 1).

La integración de las funcionalidades de Google Cardboard en una aplicación de Unity es relativamente sencilla y se explica detalladamente en las páginas web oficiales de ambos proyectos. En general, basta incluir el paquete *GoogleVRForUnity_*.unitypackage* en la lista de recursos de la aplicación, lo que produce una vista estereoscópica alineada con la orientación relativa del dispositivo móvil en el que se ejecute (Fig. 2).



Fig. 1. Estructura Google Cardboard



Fig. 2. Vista estereoscópica

La principal dificultad a la hora de utilizar este recurso proviene de los cambios constantes del framework para el desarrollo de aplicaciones de realidad virtual de Google. Desde que se comenzó a uitilizar esta tecnología en las tareas de enseñanza–aprendizaje práctico en la asignatura de "Interfaces Inteligentes", en el curso 2015–2016, ha habido una variación en la API para el desarrollo. En el curso 2015–2016 se disponía del paquete de Google Cardboard para Unity; en el curso 2016–2017, Google había lanzado DayDream, su primera apuesta por el lanzamiento de dispositivo móvil de prestaciones de gama media que mejorase la experiencia de RV.

En el curso 2017-2018, Google actualizó el framework de RV, unificando en el mismo paquete de Unity ambos dispositivos, Cardboard y Daydream. En ambos cursos, el cambio se produjo apenas un mes antes del periodo en el que se imparte la asignatura, lo que dejó obsoleto el material docente del curso previo. Existe además la dificultad añadida de contar exclusivamente con la documentación de Google, ya que la comunidad no tiene tiempo de generar otros recursos. La gran ventaja, sin embargo, es la alta productividad que se logra al utilizar el editor de escenas Unity, que permite al alumno obtener un prototipo jugable de una aplicación de RV altamente inmersiva y a bajo coste.

En este tipo de aplicaciones, por lo general altamente atractivas para los usuarios, se corre el riesgo de mermar la experiencia del usuario por la incomodidad generada por el efecto conocido como *mareo del simulador*. Por esta razón se programa una práctica para el estudio y puesta en práctica de las recomendaciones de diseño que el equipo de Google ha recopilado para aplicaciones de RV.

Por una parte tenemos consideraciones a tener en cuenta para evitar el mareo, todas aquellas destinadas a reducir la discrepancia entre la percepción real del usuario y lo que sucede en el mundo virtual. Por otra parte tenemos las pautas destinadas a orientar al usuario en esta nueva forma de interacción con la que aún no se encuentra familiarizado, como sucede con aplicaciones convencionales para PC o móviles. En esta línea es de especial importancia la práctica programada para el uso de la retícula y la interacción con objetos en la escena mediante *raycast*. La retícula es un objeto visual que advierte al usuario cuando su línea de visión ha enfocado (seleccionado) un elemento de la escena con el que puede interactuar.

B. Sensores de posición

Posteriormente, los alumnos aprenden a acceder manualmente a los valores devueltos por dichos acelerómetros, así como por la brújula interna y el sistema de posicionamiento global (GPS) del dispositivo. El código de desarrollo para todos estos elementos queda recogido en la clase *Input* del paquete *UnityEngine*, que debe importarse a la aplicación en la que se desee usar.

Los datos de salida de la brújula interna vienen dados por el atributo *Input.compass.trueHeading*, de tipo numérico en coma flotante (*float*), que indica la orientación del dispositivo respecto al Polo Norte geográfico. Aunque este dato es suficiente para la mayoría de aplicaciones útiles, el paquete *Input* también permite acceder a la orientación respecto al Polo Norte magnético, dada por el atributo *Input.compass.magneticHeading*, y a la información geomagnética en crudo, medida en microteslas, dada por el objeto *Input.compass.rawVector*. Para poder acceder a todos estos valores es necesario inicializar en la aplicación el sistema de localización del dispositivo, mediante una llamada a la función *Input.location.Start()* (Fig. 3).

La información de los acelerómetros del dispositivo móvil es fácilmente accesible en todo momento, en el objeto de tipo vector (*Vector3*) *Input.acceleration*. Los datos de tipo *Vector3* contienen tres atributos de tipo *float*, etiquetados como *x*, *y*, *z*, que en el caso de los acelerómetros indican la aceleración del dispositivo en cada eje cartesiano (Figs. 4 y 5).

Por último, el sistema de posicionamiento global del dispositivo permite acceder a sus coordenadas, en forma de valores de latitud (*latitude*), longitud (*longitude*) y altitud (*altitude*), como atributos del objeto *Input.location.lastData*. Estos atributos sólo se actualizan una vez realizada la llamada a la función *Start()* del objeto *Input.location*, también usada para obtener datos de la brújula.



Fig. 3. Captura de la aplicación "Zombie Timer α", que integra el uso de la brújula del dispositivo móvil



Fig. 4. Captura de la aplicación "VR Combat Arcade", que utiliza los acelerómetros del dispositivo móvil como método de control



Fig. 5. Captura de la aplicación "GRESBALL", que utiliza los acelerómetros del dispositivo móvil como método de control



Fig. 6. Captura de la aplicación "Program for the Investigation of Pursuing Objectives", que integra el uso del micrófono para interactuar con los personajes

La función *Start()* tiene dos argumentos opcionales: la precisión deseada y la distancia mínima de actualización, ambas en metros y con un valor por defecto de $10\,m$. Conviene además comprobar el valor del atributo *Input.location.status*, que indica si el servicio está activo (*LocationServiceStatus.Running*), antes de leer *Input.location.lastData*. Una vez termine de usarse el servicio de localización, debe detenerse con una llamada a la función *Input.location.Stop()*.

C. Sensores de entrada audiovisual

En la siguiente práctica, se indica a los alumnos cómo acceder mediante código al micrófono y a la cámara de sus teléfonos móviles, cuyos datos son procesados en las siguientes prácticas (Fig 6).

Unity permite obtener sonido desde el micrófono del ordenador o el teléfono móvil usando la función *Start (entrada, bucle, duración, frecuencia)* de la clase *Microphone*, que devuelve un objeto de tipo *AudioClip* y cuyos parámetros son:

- *entrada*: Nombre del dispositivo de entrada a utilizar, dado como una cadena de caracteres (*string*) o una cadena vacía si se desea usar el que esté disponible por defecto.
- *duración*: Duración máxima en segundos del objeto *AudioClip* generado, dada como un número entero (*int*).
- *bucle*: Valor booleano (*bool*) que indica si, una vez alcanzada la duración máxima, se debe volver al principio del *AudioClip* o parar de grabar.
- *frecuencia*: Frecuencia de muestreo, dada como un valor *float*, que define la calidad del audio generado.

Para detener la grabación, basta llamar a la función *Microphone.End (entrada)*.

La forma más general de obtener imágenes de la cámara del teléfono móvil o la webcam del ordenador es mediante la clase de Unity *WebCamTexture*, que traduce la información obtenida de dichos dispositivos a texturas 2D. Para ver las imágenes grabadas, debe asociarse el objeto *WebCamTexture* al atributo de textura visual *mainTexture* de un material y seguidamente llamar a la función *Play()* de dicho objeto. Para pausar la reproducción basta llamar a la función *Pause()* y, para detenerla, a la función *Stop()*. En el ejercicio práctico, se pidió a los alumnos hacer uso de todas estas funciones, de forma

que fuese posible capturar fotogramas aislados y conservarlos en memoria como imágenes fijas.

D. Reconocimiento de voz

Unity ofrece herramientas de reconocimiento de voz, aunque por el momento se encuentran limitadas a su uso en dispositivos equipados con el sistema operativo Windows 10 [11]. Para la utilización de estas herramientas se debe importar el paquete *UnityEngine.Windows.Speech*. Aunque dicho paquete ofrece diversos métodos para reconocer palabras y frases a partir del micrófono del dispositivo, en la asignatura de "Interfaces Inteligentes" sólo se propuso el uso de las clases *KeywordRecognizer* y *DictationRecognizer*, de menor complejidad.

La clase *KeywordRecognizer* intenta casar el audio recibido por el micrófono del ordenador o teléfono móvil con una lista de palabras clave proporcionadas. Es posible mantener varios objetos de esta clase activos al mismo tiempo, siempre que sus conjuntos de palabras no tengan ningún elemento común.

Para iniciar un objeto de este tipo, se utiliza el constructor *KeywordRecognizer (lista)*, donde el array de *string lista* contiene todas las palabras a detectar. Un objeto de esta clase puede activarse y desactivarse con sus funciones *Start()* y *Stop()*, respectivamente. Se advirtió a los alumnos la importancia de llamar a la función *Dispose()* al terminar de usar este tipo de objetos, para liberar sus recursos.

Para la detección de voz debe asociarse al objeto *KeywordRecognizer* una función de escucha del tipo *void función (datos)*, donde el parámetro *datos* de tipo *PhraseRecognizedEventArgs* contiene:

- la frase recibida *datos.text*, de tipo *string*;
- el grado de certeza *datos.confidence*, de tipo enumerado *Windows.Speech.ConfidenceLevel*, cuyos valores pueden ser *High*, *Medium*, *Low* y *Rejected*;
- la duración de la frase *datos.phraseDuration*, de tipo *TimeSpan*;
- el momento de comienzo *datos.phraseStartTime*, de tipo *DateTime*;
- el significado semántico *datos.semanticMeanings*, de tipo *SemanticMeaning[]*. Este atributo no tiene utilidad para *KeywordRecognizer*, pero sí para otras clases de reconocimiento de voz más complejas, como *GrammarRecognizer*

. Una vez creada la función de escucha, se asociará al objeto *KeywordRecognizer* mediante la instrucción *objeto.OnPhraseRecognized += función*.

Por otro lado, la clase *DictationRecognizer* intenta transcribir el audio recibido por el micrófono del ordenador o teléfono móvil, sin necesidad de un listado de palabras clave. Un objeto de esta clase también puede activarse y desactivarse con sus funciones *Start()* y *Stop()*, respectivamente. De nuevo, es importante llamar a la función *Dispose()* al terminar de usarlo para liberar sus recursos. Un objeto *DictationRecognizer* espera que se le asocien cuatro funciones de escucha:

- *objeto.DictationResult*, llamada cada vez que se reconozca una frase y que será de tipo *void función (string texto, Windows.Speech.ConfidenceLevel confianza)*
- *objeto.DictationHypothesis*, llamada cada vez que se actualice la frase capturada, de tipo *void función (string texto)*
- *objeto.DictationComplete*, llamada cada vez que se interrumpa el dictado, de tipo *void función (Windows.Speech.DictationCompletionCause causa)*, donde el parámetro *causa* es de tipo enumerado y sus valores pueden ser los siguientes:
  - *Complete*, si el dictado terminó correctamente;
  - *AudioQualityFailure*, si el dictado se interrumpió por mala calidad del audio;
  - *Canceled*, si el dictado fue cancelado o la aplicación fue pausada;
  - *TimeoutExceeded*, si se excede el tiempo estipulado para la captura;
  - *NetworkFailure*, si el dictado se interrumpió por un fallo de red;
  - *MicrophoneUnavailable*, si el dictado se interrumpió por no detectarse el micrófono;
  - *UnknownError*, en cualquier otro caso.
- *objeto.DictationError*, llamada cuando se detecte un error durante el dictado, de tipo *void función (string error, int resultado)*.

En todos los casos, las funciones de escucha se asociarán al atributo correspondiente del objeto *DictationRecognizer* mediante la instrucción *objeto.atributo += función*.

E. Realidad aumentada

Finalmente, se realiza un entrenamiento sobre la salida de la cámara para reconocer elementos visuales concretos y generar a partir de ellos una aplicación de realidad aumentada [12]. Para ello, basta agregar a un proyecto de Unity el paquete de desarrollo *vuforia-unity-xx-yy-zz.unitypackage* y el objeto prefabricado (prefab) *ARCamera*, que sustituye a la cámara principal de la escena (*MainCamera*). A continuación, basta añadir una base de datos que relacione imágenes objetivo, a capturar por la cámara del dispositivo, con objetos en 3D a mostrar en la escena.

F. Rúbrica de la evaluación

La rúbrica de la evaluación se define para contemplar cada uno de los aspectos cuya importancia se ha resaltado en este trabajo:

- **Modelos usados en la escena –** Escala: Simples, Geométricos, Complejos sin animación, Complejos con animación, Además de los modelos se cuidan los escenarios: terreno, skybox, ...
- **Complejidad de las acciones de los personajes –** Escala: Los personajes sólo avanzan por el juego, Los personajes además de avanzar interaccionan con elementos en la escena, Algún personaje interacciona de varias formas diferentes con algunos objetos de la escena,

Además de lo anterior, alguna interacción de algún personaje genera efectos especiales como como por ejemplo sistemas de partículas.
- **Variedad de personajes –** Escala: Además del jugador hay objetos estáticos, Además del jugador hay personajes dinámicos como enemigos, Además de lo anterior existe varios tipos de personajes no estáticos y que no son el jugador, Además de lo anterior el comportamiento de cada tipo de personaje ante el jugador es diferente.
- **Originalidad –** Escala: Baja, Media, Alta
- **Complejidad del desarrollo –** Escala: El código se basa exclusivamente en prefabs de la asset store y del paquete standard assets, Además de los prefabas utilizados se implementan scripts sobre al menos dos objetos de la escena invocados en update, Además de lo anterior se implementan eventos de los components de Unity, Se implementa un GameController basado en eventos que incluye algún evento definido por los alumnos.
- **Calidad del código –** Escala: Código de baja calidad, sin documentar, sin jerarquía lógica de objetos, etc., Código bien documentado., Código bien documentado en el se define una colección coherente de objetos, Además de lo anterior, se contempla de forma adecuada qué propiedades o métodos deben ser públicos, cuales privados, y se tiene en cuenta la eficiencia de cara al rendimiento en dispositivos móviles.
- **Grado de inmersión –** Escala: Grado bajo, Grado medio,Grado alto
- **Interacción con las cardboard –** Escala: No se contempla más interacción que los movimientos de cabeza, Se utiliza el botón magnético, Además de lo anterior también se utiliza un GamePad o algún otro método de interacción
- **Calidad de la interacción de RV –** Escala: En todo momento se hace seguimiento de la cabeza, Además de lo anterior se siguen las recomendaciones de la retícula, Se contemplan otras recomendaciones para las aplicaciones de RV como evitar discrepancias entre la percepción física y el mundo virtual
- **Trabajo en equipo –** Escala: El acta sólo refleja división de tareas sin ninguna conexión, El acta refleja división de tareas y al menos una puesta en común del trabajo, El acta refleja división de tareas y más de una puesta en común del trabajo.
- **Trabajo individual –** Escala: El alumno en las respuestas individuales muestra haber adquirido un dominio bajo del desarrollo de aplicaciones de RV: confunde conceptos, no sabe responder con precisión, no identifica a qué corresponden fragmentos de código., El alumno en las respuestas individuales muestra haber adquirido un dominio medio del desarrollo de aplicaciones de RV: confunde conceptos avanzados de RV, no responde con precisión a cuestiones avanzadas de RV, El alumno muestra un dominio alto en el desarrollo de aplicaciones de RV: responde con exactitud y precisión a cuestiones avanzadas de RV, así como a qué corresponde cada script implementado.
- **Otros sensores –** Escala: No se usa ningún sensor, Uso simple del micrófono o el acelerómetro, Uso complejo del micrófono o el acelerómetro, pero no los dos. O bien: uso simple de ambos sensores, Uso complejo de ambos sensores

III. Resultados y conclusiones

Las clases prácticas de la asignatura de "Interfaces Inteligentes" permiten a los alumnos desarrollar de forma creativa sus propias aplicaciones con interfaces naturales, haciendo un uso combinado de los sensores disponibles en sus teléfonos móviles. Estos ejercicios introducen al código necesario para utilizar la brújula, los acelerómetros, el sistema de posicionamiento global, la cámara y el micrófono de los dispositivos, en aplicaciones de realidad virtual o aumentada. Estos elementos son la base para las distintas técnicas de diseño de interfaces naturales, incluyendo el reconocimiento de voz e imágenes, que pueden utilizarse en el desarrollo de aplicaciones complejas y adaptativas.

El problema a destacar está en las dificultades propias del uso de tecnologías que aún están en evolución, cuyos frameworks de desarrollo cambian de un curso a otro, o aún no están disponibles para una amplia variedad de dispositivos. Por contra, la principal ventaja que aporta la metodología utilizada corresponde a la motivación que genera en los alumnos el uso de estas tecnologías utilizando herramientas productivas que en un periodo corto de tiempo les permite generar prototipos funcionales.

Al término de la asignatura, durante el curso 2017/2018, se solicitó a los 37 alumnos matriculados que compartiesen su opinión respecto a la misma en una encuesta on-line. A continuación se muestran las respuestas obtenidas:

- De todos los trabajos y prácticas encargados en la asignatura, ¿cuáles consideras que te han ayudado más en tu formación?
  - Seminarios/debates (0%)
  - Presentación oral de trabajos (7.14%)
  - Prácticas Laboratorio (92.86%)
- ¿Qué dificultades has encontrado para la realización de los trabajos/prácticas?
  - Carencia de información (23.08%)
  - Desconocimiento de las fuentes a utilizar (23.08%)
  - Falta de indicaciones por parte del responsable de la asignatura (7.69%)
  - Demasiado volumen de trabajo (0%)
  - Periodo de tiempo concedido para su elaboración y entrega (7.69%)
  - Dificultad para entender el significado de las cuestiones planteadas (23.08%)
  - Dificultades del trabajo en equipo (15.38%)
- Valora los siguientes aspectos utilizados en prácticas, desde el punto de vista del aprendizaje de la programación de interfaces naturales y la programación de aplicaciones basadas en sensores. (1 No ha sido adecuada.

2 Ha dificultado el aprendizaje. 3 No ha influido. 4 Ha facilitado el aprendizaje. 5 Ha sido fundamental.)
  - Lenguaje de programación C# (4.14)
  - Unity 3D (4.43)
  - Realidad Virtual en dispositivos móviles (4.00)
  - Framework Google Cardboard (3.43)
  - Vuforia (3.29)
  - Acelerómetro (3.79)
  - Brújula (3.69)
  - Micrófono (3.93)
  - Cámara (4.00)
- Valora los siguientes aspectos utilizados en prácticas, desde el punto de vista de tu motivación respecto a la programación de interfaces naturales y la programación de aplicaciones basadas en sensores. (1 Me ha desmotivado totalmente. 2 Ha influido negativamente en mi motivación. 3 No ha influido 4 Ha contribuido en mi motivación. 5 Me ha mantenido totalmente motivado.)
  - Lenguaje de programación C# (3.71)
  - Unity 3D (3.86)
  - Realidad Virtual en dispositivos móviles (3.86)
  - Framework Google Cardboard (2.86)
  - Vuforia (2.86)
  - Reconocimiento de voz en Unity (3.57)
- Valora los siguientes aspectos utilizados en prácticas, desde el punto de vista de los conocimientos nuevos útiles desde el punto de vista profesional que has adquirido. (1 No se ha aportado ningún conocimiento nuevo. 2 Se han aportado conocimientos nuevos insuficientes. 3 Se han aportado conocimientos nuevos aceptables. 4 Se han incrementado aspectos importantes el conocimiento 5 Totalmente nuevo)
  - Lenguaje de programación C# (3.71)
  - Unity 3D (4.14)
  - Realidad Virtual en dispositivos móviles (4.00)
  - Framework Google Cardboard (3.71)
  - Vuforia (3.64)
  - Acelerómetro (3.93)
  - Brújula (3.93)
  - Micrófono (4.00)
  - Cámara (4.00)
- Valora los siguientes aspectos utilizados en prácticas, desde el punto de vista de la dificultad que han supuesto respecto a la programación de interfaces naturales y la programación de aplicaciones basadas en sensores. (1 Ha supuesto una dificultad excesiva en las prácticas. 2 Ha supuesto una dificultad en las prácticas. 3 No ha añadido dificultad a las prácticas 4 Ha facilitado el desarrollo de las prácticas. 5 Ha facilitado totalmente el desarrollo de las prácticas.)
  - Lenguaje de programación C# (3.46)
  - Unity 3D (3.36)
  - Realidad Virtual en dispositivos móviles (3.14)
  - Framework Google Cardboard (2.79)
  - Brújula (3.07)
  - Micrófono (3.07)
  - Cámara (3.29)
  - Reconocimiento de voz en Unity (2.86)
- Indica cualquier sugerencia que tengas respecto a el aprendizaje de interfaces naturales y programación de sensores que creas que ayudarían a mejorar la enseñanza de los contenidos. (Entre las sugerencias proporcionadas por los alumnos en este apartado, destacan:)
  - Una reducción de la carga teórica de la asignatura en favor de más ejercicios prácticos.
  - El uso de Blender [13] como herramienta de modelado.
  - Equipos informáticos más preparados para la carga gráfica requerida en las prácticas de la asignatura.
  - Mayor peso a la explicación de los fundamentos de realidad virtual en dispositivos móviles.
- Indica tu valoración personal respecto a la enseñanza de la programación de interfaces naturales y sensores desarrollando una aplicación de Realidad Virtual en móviles.
  - Salvo excepciones muy puntuales, la opinión general respecto a la asignatura es muy positiva. Los alumnos han valorado su utilidad, al ser la asignatura del grado más centrada en herramientas gráficas, y mencionan haber disfrutado desarrollando juegos, pues les ha permitido observar satisfactoriamente los resultados del trabajo realizado.

Se observa por tanto una acogida mayoritariamente positiva al enfoque eminentemente práctico de la asignatura de "Interfaces Inteligentes". Los alumnos han agradecido el aprendizaje del lenguaje C# y la plataforma Unity 3D y se han visto motivados por la posibilidad de crear sus propias aplicaciones de realidad virtual, aunque no se aprecia un cierto desencanto respecto al Framework Google Cardboard y al uso de Vuforia. Se puede por tanto plantear reducir la carga práctica de dichos elementos, en favor de una introducción a la herramienta de modelado Blender.

REFERENCIAS

[1] G. Fischer and B. Reeves, "Beyond intelligent interfaces: Exploring, analyzing, and creating success models of cooperative problem solving," Applied Intelligence, vol. 1, issue 4, pp. 311–332, May 1992, Kluwer Academic Publishers.

[2] A. Malizia and A. Bellucci, "The Artificiality of Natural User Interfaces," Magazine Comm. ACM, vol. 55, issue 3, pp. 36–38, March 2012, ACM, New York, NY, USA

[3] T.M. Alisi, A. Del Bimbo and A. Valli, "Natural interfaces to enhance visitors' experiences", IEEE MultiMedia, Vol. 12, issue 3, pp. 80–85 Sept. 2005.

[4] R. Francese, I. Passero and G. Tortora, "Wiimote and Kinect: gestural user interfaces add a natural third dimension to HCI," AVI '12 Proc. Int. Working Conf. Advanced Visual Interfaces, pp. 116–123, May 2012, ACM New York, NY, USA.

[5] P. Santana, "Interfaces Naturales de Usuario - La Experiencia de la Universidad de Colima," Software Guru, vol. 43.

[6] J. Marco, E. Cerezo and S. Baldassarri, "Desarrollo de interfaces naturales para aplicaciones educativas dirigidas a niños," VIII Congreso Internacional de Interacción Persona Ordenador, pp. 79–82, 2007.

[7] J. Videla, A. Sanjuán, S. Martínez and A. Seoane, "Diseño y usabilidad de interfaces para entornos educativos de realidad aumentada," Digital Education Review, vol. 31, pp. 61–79, June 2017.

[8] R. Arnay, J. Hernández-Aceituno and E. González, “Teaching kinematics with interactive schematics and 3D models,” Computer Applications in Engineering Education, vol. 25, pp. 420–429, 2017, Wiley Periodicals.
[9] Motor de videojuegos multiplataforma Unity3D (unity3d.com)
[10] Plataforma de realidad virtual Google Cardboard (vr.google.com/cardboard)
[11] Paquete de reconocimiento de voz para Windows10 en Unity3D (UnityEngine.Windows.Speech)
[12] Paquete de realidad aumentada Vuforia para Unity3D (developer.vuforia.com)
[13] Programa de modelado 3D Blender (blender.org)

Control de una Mano Biónica usando técnicas de reconocimiento de gestos en tiempo real a través del dispositivo Leap Motion Sensor

J.S. Artal-Sevil, J.L. Montañés, A. Acón y J.A. Domínguez.
Dpto. Ingeniería Eléctrica. Escuela de Ingeniería y Arquitectura EINA.
Universidad de Zaragoza. Campus Río Ebro. María de Luna, 3.
Edificio Torres Quevedo, 50018. Zaragoza, Spain.
email: jsartal@unizar.es

***Abstract*— En el presente documento se muestra el desarrollo e implementación de un algoritmo de control destinado al accionamiento de una pequeña prótesis biónica. Como sistema de reconocimiento de gestos se ha utilizado el dispositivo comercial Leap Motion Sensor. El propósito ha sido simular el movimiento natural de la mano. Hoy en día los inminentes avances relacionados con la robótica y las técnicas modernas de control han provocado que estas disciplinas de conocimiento se hayan introducido también como complemento educativo en las enseñanzas básicas obligatorias. Desarrollar e implementar técnicas de control sobre elementos robóticos de forma local o remota es un claro ejemplo de tarea académica que provoca una motivación extra en los estudiantes de Ciencias, Tecnología e Ingeniería. Por otro lado, el Trabajo Fin de Grado (TFG) o Fin de Master (TFM), constituye una actividad académica que permite valorar en detalle las diferentes competencias adquiridas por los alumnos durante su periodo de formación universitaria. En este documento se presenta una aplicación electrónica novedosa y de actualidad, basada en el manejo de una mano biónica en tiempo real. Como resultado se ha desarrollado el control de un prototipo robótico capaz de operar simulando los grados de libertad (DOF) de la mano humana.**

Keywords*— *Bionic Hand, Motion and Gesture Recognition, Leap Motion Sensor, Control Algorithm, Hand prosthesis, Arduino, Open Source, Low Cost, 3D-Printing.

I. INTRODUCCIÓN

La aparición de aplicaciones de carácter robótico se ha multiplicado exponencialmente en estos últimos años. De esta forma es fácil percibir algunas de estas aplicaciones en nuestra vida cotidiana. En la actualidad existen muchos proyectos Open Source, de código abierto y sin ánimo de lucro, que permiten desarrollar prótesis robóticas impresas en tecnología 3D, [1]. El coste asociado a su construcción y diseño no es muy elevado; es suficiente con descargar los diferentes planos de la web, imprimir las piezas de plástico y seguir sus instrucciones de montaje. En general estos dispositivos mecánicos poseen una baja precisión, aunque permiten implementar fácilmente algoritmos de control sobre la estructura con objeto de imitar o simular los diferentes movimientos de un brazo o una mano real.

La aparición de asignaturas como la mecatrónica, en los actuales planes de estudio, ha permitido dotar de carácter multidisciplinar a la robótica e integrar y aglutinar a su vez varias disciplinas de conocimiento en una sola materia. Por otra parte, su utilización en diferentes trabajos Fin de Grado (TFG) o Fin de Master (TFM) puede resultar una solución viable y factible para estimular a los estudiantes universitarios. De este modo, en un mismo trabajo académico se combinan los aspectos mecánico, eléctrico y electrónico con el propósito de implementar una estrategia de control que permita emular los diferentes movimientos asociados a la mano biónica.

La robótica también proporciona un enfoque eficiente en el desarrollo de dispositivos de asistencia médica, debido a su gran funcionalidad, lo que ha permitido incrementar la calidad de vida de los enfermos. De este modo, en los últimos años están apareciendo diferentes aplicaciones destinadas a la rehabilitación de pacientes [2]. Por otro lado la fabricación de piezas mediante tecnologías de impresión 3D han facilitado el diseño y construcción de estos prototipos biónicos, ver fig. 1. En el trabajo académico aquí presentado se han aplicado varios sistemas y tecnologías, como el desarrollo de una técnica de control basada en el dispositivo Leap Motion Sensor [3] y su implementación en un controlador Arduino. El objetivo no es otro que mostrar al estudiante la utilidad de la teoría explicada en el aula frente a una situación real.



Fig. 1. Ejemplo de una prótesis biónica controlada mediante una plataforma embedded (Arduino Uno).

En este documento se presenta una aplicación electrónica novedosa y de actualidad, el desarrollo de un sistema de control por reconocimiento de gestos mediante el dispositivo Leap Motion Controller. El objetivo es que los movimientos efectuados por la prótesis biónica simulen al desplazamiento natural de la mano. El control por gestos es una tecnología de reciente aparición, donde los desarrolladores necesitan de una gran capacidad de síntesis y reinterpretación de los diferentes movimientos que componen la dinámica de animación y movilidad de la mano. La incorporación de esta estrategia de control ha permitido favorecer la relación interface usuario-prototipo, además de conseguir una mayor capacidad de control [4].

El objetivo del siguiente trabajo académico ha sido desarrollar una técnica de control que pueda ser usada para simular los efectos en una prótesis biónica mediante un sistema de reconocimiento de gestos. Los objetivos iniciales se han resuelto de manera satisfactoria, obteniendo un prototipo que ha superado las expectativas iniciales.

Este documento está organizado de la siguiente manera. La sección 2 revisa el estado del arte de la tecnología utilizada. El epígrafe 3 muestra el dispositivo de reconocimiento de gestos Leap Motion, indicando sus características más destacadas. También se presentan los diferentes parámetros y comandos relacionados con el movimiento de la mano. Por otra parte la sección 4 expone el procesado de información. Finalmente el ítem 5 indica las ventajas e inconvenientes de la estrategia implementada.

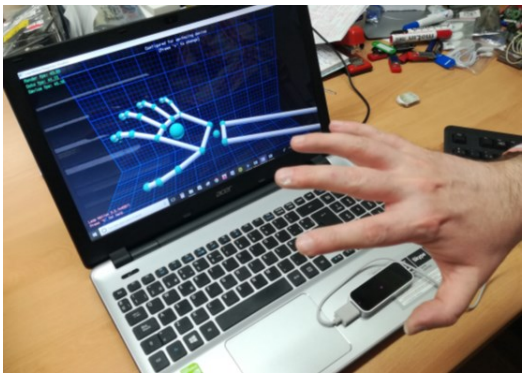


Fig. 3. Interface de la aplicación centrada en el reconocimiento de los diferentes gestos efectuados por el usuario.

II. Estado del Arte

Con el desarrollo e implementación de los nuevos métodos de control destinados a los videojuegos, entretenimiento o diversión (por ejemplo: Wii, Kinect, Xtion Sensor, Leap Motion, etc.), aparece la posibilidad de generar distintas aplicaciones de carácter muy intuitivo. El control basado en el reconocimiento de los gestos efectuados por el usuario es una tecnología de reciente aparición, ver fig. 3. De este modo surge la oportunidad de experimentar con nuevos métodos de interacción que hasta el momento sólo existían en películas de ciencia ficción. Como ejemplo la fig. 2 muestra un fotograma de la película Minority Report (2002) donde el protagonista Tom Cruise, controla una computadora mediante los gestos realizados con sus manos.

En esta última década, la literatura científica recoge diferentes técnicas y estrategias de control de prótesis robóticas y exoesqueletos. En la mayoría de las ocasiones son elementos externos controlados mediante las señales eléctricas que se producen cuando se contrae el músculo de forma voluntaria [5]. Estos subsistemas están basados en el procesado de las señales electromiográficas obtenidas por medio de los sensores EMG colocados sobre la piel. Esta técnica permite la detección y medición de los diferentes biopotenciales eléctricos, que a su vez son adquiridos mediante los electrodos ubicados en la superficie del brazo [6].

Uno de los principales problemas que debe abordar el diseñador es el limitado número de ubicaciones destinadas al control muscular, lo que aumenta la dificultad y complejidad en el diseño del sistema. Otro campo de estudio significativo está siendo el pre-procesamiento de las señales generadas por las neuronas durante el desarrollo de diferentes movimientos musculares. El objetivo es activar y controlar el desplazamiento de las estructuras biónicas. Un hándicap en la investigación actual es la sincronización de todas estas señales EMG con la velocidad y par motor de las prótesis robóticas, permitiendo su desplazamiento de forma natural.



Fig. 2. Fotograma de la película Minority Report dirigida por Steven Spielberg en 2002. En la imagen aparece un interface de usuario basado en el concepto de manipulación de información y datos mediante técnicas de reconocimiento de gestos.

Actualmente existen diferentes prototipos tecnológicos de prótesis biónicas funcionales que se encuentran disponibles en el mercado. La mayoría de ellas poseen un alto grado de ergonomía, aunque su coste es elevado. Algunos ejemplos son: beBionic Hand [7], i-Limb Ultra [8] o Vincent-evolution Hand [9], etc. Así, Krausz et al. [10] presentan el diseño y desarrollo de un proyecto Open Source de mano biónica. El prototipo desarrollado posee 6-DOF (degree-of-freedom). De este modo el documento muestra el diseño de los diferentes mecanismos de accionamiento en cada uno de los dedos, así como los componentes utilizados. Los autores consideraron que tanto el aspecto como las dimensiones de la mano biónica fuesen similares al supuesto real. El prototipo presentado fue testeado

y posteriormente fabricado con la finalidad de comprobar diferentes estrategias de control "in-situ".

Por otro lado, Fajardo et al. [11] también han desarrollado una mano biónica con múltiples grados de libertad (DOF), en este supuesto activada mediante señales EMG. Proponen un sistema de control basado en técnicas de "Machine Learning" con objeto de interpretar la intención del usuario. Todo el sistema se encuentra integrado en un DSP. Un módulo de reconocimiento de voz (Easy-VR) también es introducido con objeto de activar conscientemente distintas posturas predefinidas.

En los últimos años, numerosos autores han publicado estudios sobre la aparición de la tecnología de control por gestos y su interacción con la robótica. En esta misma línea, Artal-Sevil y Montañés [12] presentan el diseño y control de un brazo robótico articulado situado sobre un robot móvil autónomo. La estrategia de control implementada se encuentra basada en el dispositivo Leap Motion Sensor. El objetivo es el control del prototipo en tiempo real de forma inalámbrica. El diseño, desarrollo e implementación del brazo robótico sobre la plataforma móvil son descritos a lo largo del documento. Los algoritmos asociados a la estrategia de control también son presentados. Asimismo los resultados obtenidos son mostrados, indicando las diferentes ventajas e inconvenientes de la solución adoptada.

Del mismo modo, Bassily et al. [13] proponen un nuevo algoritmo de control adaptativo destinado a un brazo articulado 6-DOF. El interface de comunicaciones hombre-máquina está desarrollado también mediante el dispositivo Leap Motion Sensor. Este documento proporciona algunas características de otros dispositivos destinados a la interacción usuario-ordenador mediante una estrategia basada en el control por gestos, como por ejemplo: Nintendo Wii o Microsoft Kinect. Mientras, Bahrami et al. [14] analizan el desarrollo y funcionamiento de una mano biónica. La tecnología RFID ha sido integrada en el dispositivo con el propósito de identificar la forma del objeto e indicar al mismo tiempo la secuencia de gestos a desarrollar. El control fue llevado a cabo mediante un interface gráfico de usuario (GUI) sobre una aplicación para smartphone (iOS system).

A su vez otros autores, Lu et al. [15] o Jin et al. [16] presentan un sistema de reconocimiento de gestos centrado en el dispositivo Leap Motion Sensor; describiendo la integración del sensor en la plataforma embedded analizada y el formato de las variables consideradas (roll, pitch, yaw). Mientras que Ling y Riu [17] o Jung et al. [18] estudian la integración de gafas de realidad virtual (VR-Glasses) y el dispositivo Leap Motion en contextos educativos. El propósito fue desarrollar diferentes herramientas interactivas que pudieran ser aplicables dentro y fuera del aula. En el documento se muestra su implementación en clase o como complemento de las actividades académicas. Entre las bondades del método destaca la mejora en el proceso de enseñanza-aprendizaje así como un aumento en la eficacia, motivación y rendimiento de los estudiantes.

Por otra parte, Eqad et al. [19] o Mohandes et al. [20] utilizan el smartphone y el dispositivo 3D Leap Motion como un sistema de reconocimiento del lenguaje de signos. El documento presenta una aplicación Android para la traducción del lenguaje arábico en tiempo real. Este sistema permite la captura del lenguaje de signos del usuario para su posterior traducción. Los autores hacen hincapié en su fácil programación debido a la incorporación de las APIs (Application Programming Interfaces), la interface gráfica de usuario GUI (Graphical User Interface) y el bajo coste del dispositivo.

III. Diseño del Sistema Leap Motion Controller.

El principal objetivo de este documento ha sido el desarrollo de una estrategia de control para que las acciones de la mano biónica se parezcan lo máximo posible a su equivalente real. Para ello se ha considerado la influencia del movimiento a realizar. Esto se puede conseguir mediante el escalado apropiado de los diferentes movimientos básicos. El prototipo aquí desarrollado posee varios grados de libertad (5-DOF). A su vez los dedos de la prótesis son accionados por distintos servomotores.



Fig. 4. En el interface de usuario pueden apreciarse las diferentes variables proporcionadas por el dispositivo Leap Motion. Los parámetros relativos a la posición de los distintos elementos son gestionados por sistema de control.

A. Leap Motion Sensor

En la actualidad existen diferentes opciones comerciales en el mercado para desarrollar una estrategia de control por gestos [13], por ejemplo: Microsoft Kinect, Asus Xtion Sensor, Wii Remote, MYO Gesture Control o Leap Motion Controller. El dispositivo seleccionado ha sido este último, debido a su bajo nivel de complejidad y coste (<50€). Además su grado de precisión es superior al resto de dispositivos comerciales.

Así pues, el reconocimiento de los diferentes gestos de la mano ha sido desarrollado con el dispositivo Leap Motion, un periférico provisto de sensores infrarrojos IR que reconoce el movimiento del antebrazo, mano y dedos simultáneamente, ver fig. 4. Estas variables son procesadas por el ordenador con objeto de su descomposición en movimientos más simples y básicos. Posteriormente toda esta información es enviada a la prótesis robótica. El control es realizado por medio del controlador Arduino, quién recibe los diferentes comandos

procedentes del ordenador, vía comunicación serie, y transmite la información a cada uno de los servomotores implicados en el movimiento de los distintos dedos. El propósito ha sido separar el proceso de identificación y obtención de los parámetros de posición relativa correspondiente al sistema de reconocimiento de gestos, efectuado por el ordenador portátil, del sistema de control de los diferentes actuadores que constituyen la prótesis biónica.

El dispositivo consta de dos cámaras monocromáticas junto con tres LEDs infrarrojos a través de los cuales genera un patrón 3D de puntos [21]. De este modo es capaz de obtener 200 imágenes por segundo de datos, que transfiere al ordenador para que el software desarrolle su posterior análisis mediante los algoritmos que integra. En la fig. 4 se puede observar el interface gráfico de usuario proporcionado por la aplicación. En la imagen se aprecian diferentes puntos rojos que se corresponden con cada una de las intersecciones o posiciones espaciales de referencia que ocupan los dedos, muñeca y la palma de la mano. Todos estos parámetros geométricos son analizados por el software.

B. Parámetros y Coordenadas

El procesado de información se puede realizar mediante el SDK (Software Development Kit). Esta herramienta puede ser descargada de la web https://developer.leapmotion.com/. La aplicación permite transformar las señales enviadas por el sensor Leap Motion en datos y vectores intuitivos como dedos, manos, posiciones o gestos, con objeto de facilitar el trabajo del programador (en este caso del estudiante), ver la tabla I.

TABLA I. Parámetros obtenidos desde el software Leap Motion.

Palma de la Mano		Dedos	
Variable	Tipo	Variable	Tipo
Normal	vector	Direction	vector
Position	vector	Length	mm
Velocity	mm/sec	Tip position	vector
Confidence	float [0, 1]	Tip velocity	mm/sec
Pinch strength	float [0, 1]	Dip position	vector
Grab strength	float [0, 1]	Pip position	vector
Sphere center	vector	Mcp position	vector
Sphere radius	mm		

La tabla I enumera los principales parámetros de manos y dedos proporcionados por la API (Application Programming Interface). Junto al parámetro se indica el tipo de variable y su unidad. Entre la información más sobresaliente relacionada con la palma de la mano destaca: la normal (un vector unitario de dirección perpendicular a la mano), posición (la posición central de la palma de la mano) y velocidad (en milímetros por segundo). La fuerza de agarre (*Grab strength*) es un parámetro flotante entre cero y uno. Con "0" se indica la mano abierta mientras que "1" implica la mano cerrada. Un parámetro a tener en consideración es *Pinch strength* que muestra el rango de apertura entre el pulgar y otro dedo cualquiera de la misma mano. De forma similar, el centro de la esfera (*Sphere center*) y el radio (*Sphere radius*) se calculan sobre la base de una esfera virtual, suponiendo que la mano estuviese sosteniendo una pelota, ver fig. 5.

El software Leap Motion detecta el movimiento de la mano y dedos observando las posiciones de estos en 3D, ver fig. 4. La aplicación analiza el movimiento teniendo en consideración el frame anterior y el actual, sintetizando así los movimientos de traslación, rotación y factores de escalado de cada uno de los objetos. Como variables considera los siguientes datos: número de manos y dedos, posición de cada mano y dedo, ángulo de la mano y velocidad de la palma. La fig. 5 muestra el sistema de coordenadas utilizado por el dispositivo.

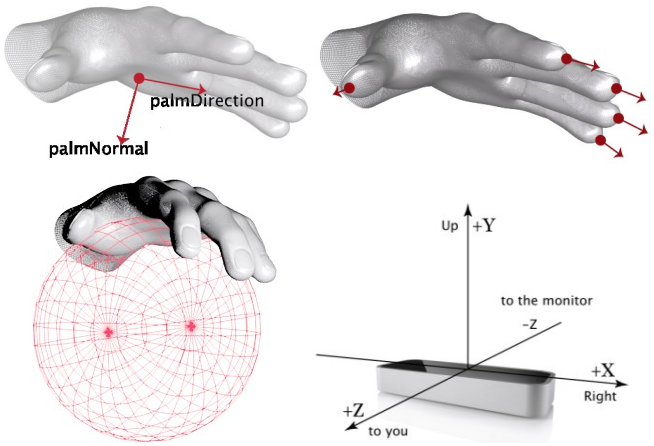


Fig. 5. Sistema de ejes del dispositivo Leap Motion Sensor y análisis del desplazamiento de palma y dedos. También es posible apreciar la esfera virtual generada mediante la curva de la mano.

La información y los parámetros correspondientes a los diferentes dedos, también son recogidos por la aplicación. En este supuesto el software proporciona para cada dedo: la dirección (un vector unitario de dirección longitudinal) junto con su longitud (en milímetros). Todos los detalles de los diferentes parámetros son mostrados en la tabla I. Los datos correspondientes a las posiciones relativas entre las falanges (tip, dip y pip) y metacarpianos (mcp) también son registrados por la aplicación. La fig. 6 muestra de forma simplificada las variables tipo vector consideradas como referencia y su correlación con el modelo real.

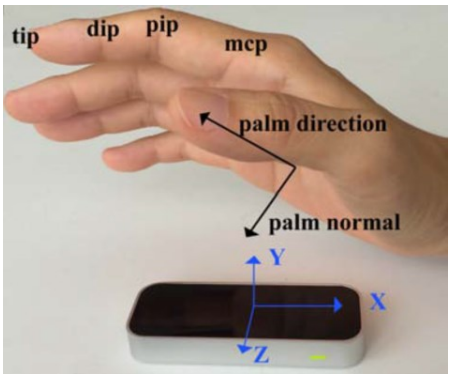


Fig. 6. Conjunto de variables y coordenadas proporcionadas por el software Leap Motion Sensor.

También hay que indicar que algunos de los parámetros proporcionados por la API no son totalmente adecuados para

desarrollar el control inmediato de la prótesis robótica. De este modo resulta necesario el procesado posterior de los datos e información adquiridos. Para obtener un dato relativo a la posición de la mano o dedos es necesario hacer referencia al objeto y escoger el dato que se desea procesar. Así a través de los siguientes comandos es posible obtener:

Posición dedo:

frame.fingers(referencia_dedo).tipPosition().get(referencia_eje)

Posición palma:

frame.hands().palmPosition().get(referencia_eje)

C. *Arduino*

Hoy en día existen multitud de tarjetas microcontroladoras que debido a su bajo coste y versatilidad están siendo utilizadas tanto en robótica, mecatrónica como en investigación. Algunos ejemplos son: Raspberry-Pi, Arduino, BeagleBone, Odroid-C1, Orange-Pi, Up-Core, Humming Board, Banana-Pi, etc. En este caso, para el desarrollo del prototipo fue seleccionado el modelo Arduino Uno, ya que aunque se trata de uno de los modelos más básicos y sencillos cumple con los requerimientos y exigencias planteados. Es un tipo de controlador de código abierto y software de programación libre, muy versátil y a un precio asequible.

Como característica más relevante destaca la conectividad ya que disponen de un gran abanico de puertos de salida, lo que permite el acceso a diferentes tipos de periféricos. Su entorno de trabajo es muy sencillo y manejable mientras que su complejidad es relativamente baja.

IV. Control y Procesado de la Información.

En el diagrama esquemático de la fig. 7 se puede observar el sistema de procesado de información (Leap Motion), obtención y multiplexados de los datos y señales PWM junto con el control de los servos de la prótesis biónica durante el desarrollo del proyecto abordado.

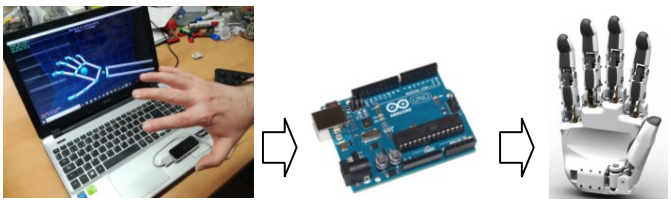


Fig. 7. Diagrama esquemático del entorno de usuario: reconocimiento de gestos (Leap Motion), procesado y envío de la información (Arduino) junto con la prótesis biónica.

La obtención de las coordenadas relativas a la posición y desplazamiento de los diferentes elementos se realiza mediante el software Leap Motion. En los siguientes epígrafes se muestra con mayor detalle el procedimiento de obtención de la información y estimación de la distancia. De forma adicional, también se ha desarrollado un sencillo control manual de la prótesis robótica. En este supuesto el teclado sustituye al sistema de reconocimiento de gestos. De este modo el movimiento de cada uno de los dedos es función del número de pulsaciones efectuadas.

Por otra parte, el sistema de control tiene por objeto modificar la posición de cada dedo con respecto al centro de la palma de la mano, ver fig. 4. De esta forma, cada una de las articulaciones incorpora un pequeño servomotor HITEC para permitir desarrollar los movimientos de rotación o translación. En esta aplicación, cada uno de los servomotores es controlado mediante una señal PWM proporcionada por el controlador Arduino.

A. *Envío de Datos*

El envío de la información entre el dispositivo Leap Motion y Arduino se efectúa mediante un multiplexado. En las siguientes líneas de código puede apreciarse el procedimiento de envío de la información. El primer dato se corresponde a la selección del dedo (1001, 1002,… 1005), mientras que el segundo dato recoge su desplazamiento.

Así el primer dato deja un flag en el controlador indicando a que dedo atribuir el siguiente dato asignado (0-999). Esta información se corresponde al desplazamiento del dedo. Como se muestra en las líneas de código del envío de información, los datos de Leap Motion son obtenidos mediante funciones. Una para cada dedo con la denominación "dedo"(leap). Se justifica el uso de funciones con el propósito de no sobrecargar el bucle principal del programa. La idea es ejecutar las funciones sólo cuando sea necesario para enviar el dato posteriormente por el puerto serie.

```
//Selección de los dedos
//pulgar
  if ((orden==1)){salida=1001;}
  if ((orden==2)){salida=pulgar(lead);}
//índice
  if ((orden==3)){salida=1002;}
  if ((orden==4)){salida=indice(lead);}
//corazón
  if ((orden==5)){salida=1003;}
  if ((orden==6)){salida=corazon(lead);}
//anular
  if ((orden==7)){salida=1004;}
  if ((orden==8)){salida=anular(lead);}
//meñique
  if ((orden==9)){salida=1005;}
  if ((orden==10)){salida=meñique(lead);}
```

B. *Obtención de los diferentes parámetros mediante el dispositivo Leap Motion Controller*

A modo de ejemplo se muestra a continuación el código que aparece en la función *índice* (leap), a través del cual se obtiene el dato de la posición relativa que ocupa el dedo índice con respecto al centro de la palma de la mano. De este modo es posible conocer la distancia que existe entre ambos puntos, y por lo tanto obtener el grado de apertura o cierre del dedo. Como puede apreciarse en las líneas de código, el proceso

seguido para el desplazamiento del dedo índice de la mano biónica se corresponde con:

- Obtención de las coordenadas xyz correspondiente al dedo índice (*tipPosition*).
- Obtención de coordenadas que ocupa el centro de la palma de la mano (*palmPosition*).
- Cálculo de la distancia entre ambos puntos.
- Polarización. Se ha tomado como punto de referencia el punto más próximo entre ambas. Punto inicio (0).
- Maximización del rango. En este caso el punto más lejano entre ambas se corresponde con el entero 999.

```
//Seleccionar dedo índice
    finger ind = frame.fingers().get(1);

//Obtener coordenadas xyz del dedo índice
    posindice0=ind.tipPosition().get(0);
    posindice1=ind.tipPosition().get(1);
    posindice2=ind.tipPosition().get(2);

//Obtener coordenadas xyz del centro de la palma de la mano
    pospalma0=hand.palmPosition().get(0);
    pospalma1=hand.palmPosition().get(1);
    pospalma2=hand.palmPosition().get(2);

//Distancia entre dedo índice y centro de la palma mano
    disindice0=pospalma0-posindice0;
    disindice1=pospalma1-posindice1;
    disindice2=pospalma2-posindice2;
    distanciaindice=Math.sqrt(disindice0*disindice0+
disindice1*disindice1+disindice2*disindice2);

//Polarización (convertir distancia mínima entre dedo y centro palma)
    distanciaindicepolarizada=distanciaindice+polarizacionindice;

//Dato a enviar por puerto serie para aprovechar máximo rango (0-999)
    indice= (int) 999*distanciaindicepolarizada/rangoindice;
    if ((indice>=999)){indice=999;}
    if ((indice<=0)){indice=0;}
```

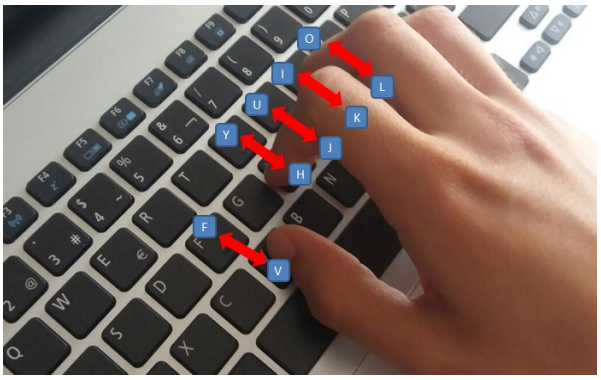


Fig. 8. Control manual mediante teclado. Conjunto de teclas que permiten el desplazamiento de cada uno de los dedos de la mano biónica.

C. Control manual mediante teclado

Además del control por reconocimiento de gestos en tiempo real, mediante los datos proporcionados por el dispositivo Leap Motion, también se ha implementado otro modo de operación manual basado en el teclado. En este supuesto se han empleado los pulsos sobre las diferentes teclas para variar la consigna de posición correspondiente a cada uno de los 5 dedos (valores entre 0 y 999), ver fig. 8.

En este supuesto también se ha implementado una polarización de la información similar al reconocimiento de gestos. El envío de los datos al controlador Arduino sigue el mismo protocolo de multiplexado. A continuación se presenta la parte del código que modifica las variables de posición de cada uno de los dedos, cuando las correspondientes teclas son pulsadas. Cada una de las pulsaciones permite incrementar o decrementar cada parámetro, y de esta forma modificar en cada momento la posición que ocupa cada dedo con respecto al centro de la palma de la mano.

```
//Control modo pulsador
    if ((key==' f ')){pulgar=pulgar+1;}
    if ((key==' v ')){pulgar=pulgar-1;}
    if ((key==' y ')){indice=indice+1;}
    if ((key==' h ')){indice=indice-1;}
    if ((key==' u ')){corazon=corazon+1;}
    if ((key==' j ')){corazon=corazon-1;}
    if ((key==' i ')){anular=anular+1;}
    if ((key==' k ')){anular=anular-1;}
    if ((key==' o ')){meñique=meñique+1;}
    if ((key==' l ')){meñique=meñique-1;}
```

V. CONCLUSIONES

La realización de un TFG o TFM aplicado dentro del ámbito de ciencias, tecnologías o ingenierías, ha permitido la evaluación de las competencias, habilidades y destrezas adquiridas por los estudiantes en el proceso de formación universitaria. Por otro lado también permite incrementar su grado de motivación durante el análisis y desarrollo del prototipo. En este documento se ha presentado el diseño y técnica de control de una prótesis biónica articulada a través del dispositivo Leap Motion Sensor.

La implementación de una estrategia de control basada en el reconocimiento de gestos mediante Leap Motion Sensor, ha permitido mejorar la relación con el interface de usuario. A su vez ha sido posible optimizar la capacidad de control y dotar de mayor flexibilidad al prototipo. El desarrollo del control manual ha permitido comprobar su funcionamiento de forma rápida y ha mejorado también el manejo de la prótesis biónica. Los objetivos iniciales se han resuelto de manera satisfactoria, obteniendo como resultado un prototipo que ha superado las expectativas iniciales y con un coste reducido.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Universidad de Zaragoza para el desarrollo del presente trabajo, a través del Programa de Innovación e Investigación Educativa (PIIDUZ 2017/18). Referencia de Proyecto: PIIDUZ_17_059.

REFERENCIAS

[1] J. Koprnicky, P. Najman and J. Safka. "3D printed bionic prosthetic hands". International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM 2017). *IEEExplore Digital Library*. Donostia-San Sebastian, Spain. 24-26 May'17, pp.: 1 to 6.

[2] M. Alimanova, S. Borambayeva, D. Kozhamzharova, N. Kurmangaiyeva, D. Ospanova, G. Tyulepberdinova, G. Gaziz and A. Kassenkhan. "Gamification of Hand Rehabilitation Process Using Virtual Reality Tools: Using Leap Motion for Hand Rehabilitation". *IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC 2017). IEEExplore Digital Library*. Taichung, Taiwan. 10-12 April'17, pp.: 336 to 339.

[3] Reference Manual Leap Motion Sensor (February 2016). Leap Motion's Developer Guide. http://www.leapmotion.com

[4] Kobayashi F., Okamoto K. and Kojima F. "Robot-human handover based on position and posture of human hand". *15th International Symposium on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS'14) and 7th International Conference on Advanced Intelligent Systems (ISIS'14). IEEExplore Digital Library*. Volume 33, Issue 4, 3-6 December 2014, Kitakyushu (Japón), pp 918 to 921.

[5] Wan-Ting Shi, Zong-Jhe Lyu, Shih-Tsang Tang, Tsorng-Lin Chia and Chia-Yen Yang. "A bionic hand controlled by hand gesture recognition based on surface EMG signals: A preliminary study". *Byocybernetics and Biomedical Engineering. Elsevier ScienceDirect.* Vol. 38 (2018); pp.: 126 to 135.

[6] J. Zhao, Z. Xie, L. Jiang, H. Cai, H. Liu and G. Hirzinger. "A Five-fingered Underactuated Prosthetic Hand Control Scheme". *The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics. BioRob 2006. IEEExplore Digital Library*. Pisa, Italy, 20-22 February 2006; pp.: 995 to 1000.

[7] Información obtenida en la siguiente dirección web (Febrero 2018): http://es.bebionic.com/

[8] Información obtenida en la siguiente dirección web (Febrero 2018): http://www.touchbionics.com/products/active-prostheses/i-limb-ultra

[9] Información obtenida en la siguiente dirección web (Febrero 2018): https://vincentsystems.de/en/prosthetics/vincent-evolution-2/

[10] N.E. Krausz, R.A.L. Rorrer and R.F. Weir. "Design and Fabrication of a Six Degree-of-Freedom Open Source Hand". *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. IEEExplore Digital Library*. Volume: 24, issue: 5, pp.: 562 to 572.

[11] J. Fajardo, A. Lemus and E. Rohmer. "Galileo bionic hand: sEMG activated approaches for a multifunction upper-limb prosthetic". *IEEE Central American and Panama Convention (CONCAPAN 2015). IEEExplore Digital Library*. Tegucigalpa, Honduras. November'15, pp.: 1 to 6.

[12] J.S. Artal-Sevil and J.L. Montañés. "Development of a robotic arm and implementation of a control strategy for gesture recognition through Leap Motion device". *Technologies Applied to Electronics Teaching, TAEE 2016. IEEExplore Digital Library*. Seville, Spain. 22-24 June'16, pp.: 1 to 9.

[13] Bassily D., Georgoulas C., Guettler J., Linner T. and Bock T. "Intuitive and Adaptive Robotic Arm Manipulation using the Leap Motion Controller". *41st International Symposium on Robotics; Proceedings of ISR/Robotik 2014. IEEExplore Digital Library*. 2-3 June 2014. Munich, Germany. Pages: 1 to 7.

[14] S. Bahrami, H. Jafarzadeh, S. Naddaf, S. Darvishi, S.A. Esfehani, P. Pishbin, F. Babazadeh, A. Makhdoumi, A. Akbarzadeh and A. Hajipour. "Simplifying user interaction solutions for the FUM Bionic Hand-I". *International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM 2016). IEEExplore Digital Library*. Tehran, Iran. 26-28 October'16, pp.: 465 to 470.

[15] W. Lu, Z. Tong and J. Chu. "Dynamic Hand Gesture Recognition with Leap Motion Controller". *IEEE Signal Processing Letters. IEEE Signal Processing Letters. IEEExplore Digital Library*. Volume. 23, issue 9, July 2016; pp.: 1188 to 1192.

[16] H. Jin, Q. Chen, Z. Chen, Y. Hu and J. Zhang. "Multi-LeapMotion sensor based demonstration for robotic refine tabletop object manipulation task". *CAAI Transactions on Intelligence Technology. Elsevier ScienceDirect*. Volume 1 (2016), pp.: 104 to 113.

[17] H. Ling and L. Rui. "VR glasses and leap motion trends in education". *International Conference on Computer Science & Education (ICCSE 2016). IEEExplore Digital Library*. Nagoya, Japan. 23-25 August'16, pp.: 917 to 920.

[18] W. Jung, W. Cho, H. Kim and W. Woo. "BoostHand : Distance-free Object Manipulation System with Switchable Non-linear Mapping for Augmented Reality Classrooms". IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR-2017). *IEEExplore Digital Library*. Nantes, France. 9-13 October'17, pp.: 321 to 325.

[19] A. Eqab and T. Shanableh. "Android mobile app for real-time bilateral Arabic sign language translation using leap motion controller". *International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA 2017). IEEExplore Digital Library*. Ras Al Khaimah, United Arab Emirates. 21-23 November'17, pp.: 1 to 5.

[20] Mohandes M., Aliyu S. and Deriche M. "Arabic sign language recognition using the leap motion controller". *IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE2014). IEEExplore Digital Library*. 1-4 June 2014. Istanbul. Pages: 960 - 965

[21] A.F. Cavalcanti, F.B.S. de Medeiros and R.R. Dantas. "Evaluate Leap Motion Control for Multiple Hand Posture Recognition". *19th Symposium on Virtual and Augmented Reality, SVR 2017. IEEExplore Digital Library*. Curitiba, Brazil, 01-04 November 2017; pp.: 341 to 344.

Diseño de un Brazo Robótico de bajo coste controlado por Sensores EMG Superficiales.

J.S. Artal-Sevil, A. Acón, J.L. Montañés y J.A. Domínguez.
Dpto. Ingeniería Eléctrica. Escuela de Ingeniería y Arquitectura EINA.
Universidad de Zaragoza. Campus Río Ebro. María de Luna, 3.
Edificio Torres Quevedo, 50018. Zaragoza, Spain.
email: jsartal@unizar.es

***Abstract*— El propósito del presente documento ha sido la construcción de una prótesis robótica de bajo coste y su control mediante la plataforma Arduino. La aplicación de sensores superficiales electromiográficos EMG/ECG ha permitido llevar a cabo el control del prototipo de una forma sencilla y eficaz, mediante el simple movimiento de la mano. Estos sensores sirven como puente para detectar los pequeños pulsos eléctricos producto de la actividad muscular y transformarlos en una señal analógica que el microprocesador es capaz de interpretar. Hoy en día los inminentes avances relacionados con la robótica y las técnicas modernas de control han provocado que estas disciplinas de conocimiento puedan ser usadas como complemento educativo en las enseñanzas básicas obligatorias. Por otra parte la técnica de impresión 3D ha permitido realizar el modelado y aplicarlo posteriormente a una prótesis robótica. El trabajo Fin de Grado (TFG) o Fin de Master (TFM) constituye una tarea académica que permite valorar las diferentes competencias y destrezas adquiridas por los estudiantes durante su periodo universitario. Desarrollar e implementar técnicas de control sobre diferentes elementos robóticos de forma local o remota es un claro ejemplo de actividad académica que siempre provoca una motivación adicional en los estudiantes de Ciencias, Tecnología o Ingeniería. Así en este documento se presenta una aplicación electrónica novedosa y de actualidad como es la construcción de una prótesis biónica. Al mismo tiempo se discuten los diferentes detalles de su implementación junto con los resultados experimentales obtenidos.**

Keywords*— *Robotic Arm, Surface EMG Sensor, Sensor based Medical Application, ECG/EMG signals, Low Cost, Arduino, Open Source Projects, Data Acquisition System, 3D Printer.

I. INTRODUCCIÓN

La Ingeniería Biomédica está desarrollando continuamente nuevos dispositivos y soluciones tecnológicas para ayudar a los seres humanos a recuperar sus funciones físicas pérdidas o a mejorar los procesos de rehabilitación. Algunos grupos de investigación han dirigido su objetivo a la reducción del coste en la construcción de las prótesis inteligentes [1]. Para ello es posible utilizar sistemas mecánicos y de control fácilmente accesibles de forma comercial y por tanto con costes más reducidos [2], [3]. En general estos dispositivos mecánicos poseen una baja precisión, aunque permiten implementar fácilmente algoritmos de control sobre la estructura con objeto de imitar o simular los diferentes movimientos de un brazo o una mano real.

Hoy en día existen varios proyectos sin ánimo de lucro y de código abierto, Open Source [4], que permiten desarrollar una prótesis impresa en tecnología 3D. La impresión 3D no es únicamente utilizada dentro de los sectores industriales o en el desarrollo de prototipos. La principal ventaja de esta técnica de impresión es que su coste no es muy elevado. Esta tecnología ha demostrado su diversidad en múltiples aplicaciones en el campo médico. Así en 2016, investigadores de la Universidad de Washington, consiguieron realizar una prótesis de mano robótica que imita por completo los huesos y tejidos de una mano. Es un dispositivo mecánico de alta precisión. Todos sus componentes imitan la estructura real de la mano, esqueleto, ligamentos, articulaciones, tendones y masa muscular.

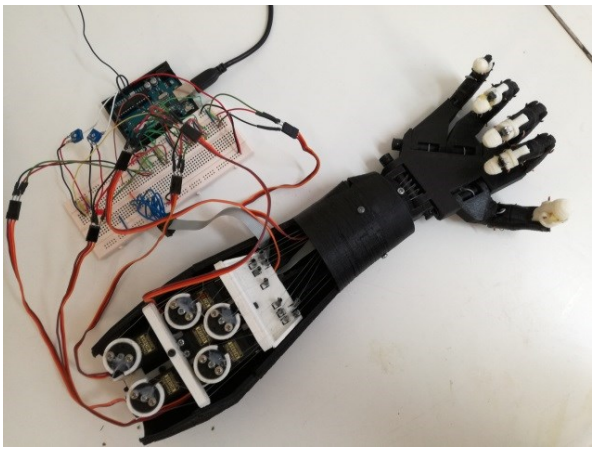


Fig. 1. Prototipo de brazo robótico desarrollado mediante impresión 3D. La imagen muestra los diferentes servomotores que actúan sobre cada uno de los dedos. El sistema de control está basado en el controlador Arduino Uno.

En este documento se presenta una aplicación electrónica novedosa y de actualidad, el desarrollo de una prótesis biónica y su control mediante sensores EMG/ECG. El objetivo ha sido mostrar la utilidad de la teoría con un caso práctico-real, al mismo tiempo que el estudiante desarrolla su TFG (Trabajo Fin de Grado). La utilización de la robótica en este tipo de actividades académicas universitarias puede ser una solución

viable y factible, ya que permite aglutinar a su vez varias tecnologías en una sola disciplina de conocimiento.

En el caso analizado en el presente documento, ver fig. 1, se han integrado varias tecnologías y dispositivos como la fabricación de elementos mediante técnicas de impresión 3D, el desarrollo de un sistema basado en la plataforma Arduino, el diseño de un sistema analógico que integra los sensores EMG/ECG y el control de los diferentes servos y actuadores que constituyen el prototipo.

Como resultado se ha desarrollado el control de un prototipo robótico capaz de operar simulando los grados de libertad (6-DOF) de la mano humana, ver fig. 1. El propósito ha sido controlar los diferentes movimientos de la prótesis articulada (muñeca y cada uno de los dedos de la mano). Las señales EMG obtenidas en el antebrazo son utilizadas para determinar los movimientos de los diferentes elementos de la prótesis biónica, ver fig. 2.



Fig. 2. Ejemplo de sensor EMG/ECG superficial utilizado para el control de la prótesis robótica. El sistema incluye los electrodos y la etapa analógica de instrumentación en modo diferencial.

Este documento está organizado de la siguiente manera. La sección 2 revisa el estado del arte de la tecnología utilizada, comparando algunos ejemplos. El epígrafe 3 muestra varios proyectos Open Source, indicando sus características más destacadas. También se presentan los diferentes parámetros y comandos relacionados con el movimiento de la prótesis biónica. Por otra parte la sección 4 expone el procesado de la información. El sistema basado en el sensor EMG también es analizado. Por último el ítem 5 indica las distintas ventajas e inconvenientes de la estrategia implementada.

II. Estado del Arte

Los sensores EMG/ECG son utilizados en estos últimos años como elementos para desarrollar subsistemas de control en brazos articulados [5]. Esta técnica permite la detección y medición de los biopotenciales eléctricos asociados al cuerpo humano. Actualmente la mayoría de las prótesis externas son controladas mediante las señales eléctricas que se producen cuando se contrae el músculo de forma voluntaria [6]. En el supuesto aquí planteado las bioseñales son adquiridas mediante los diferentes electrodos ubicados en la superficie del brazo.

Uno de los principales problemas que debe abordar el diseñador y programador de estos sistemas robóticos es el limitado número de ubicaciones destinadas al control muscular. Este motivo incrementa la complejidad en el diseño e implementación del sistema. De esta forma un hándicap de la investigación es la sincronización de todas estas señales EMG con la velocidad y par motor de la prótesis biónica, permitiendo su funcionamiento con el desplazamiento de la mano de una forma sencilla y natural.

En estos últimos años numerosos autores han publicado estudios de investigación centrados en el uso e interacción con esta tecnología. Así Saponara [7] presenta un prototipo destinado al control de los diferentes servomecanismos de un brazo robótico mediante sensores basados en tecnología EMG. El dispositivo posee 5 grados de libertad (5-DOF) y además dispone de almacenamiento de energía integrado. El ejemplo mostrado está planteado para aplicaciones robóticas destinadas a la rehabilitación. Shin et al. [8] proponen un sistema de reconocimiento de gestos para el control del movimiento en un robot móvil. Como sensores utilizan un IMU sensor (unidad de medición inercial ortogonal que contiene 3 giroscopios y 3 acelerómetros en su interior) y varios elementos EMG. La plataforma Arduino fue utilizada como controlador con objeto de facilitar la interacción con el robot. Los autores indican que la combinación de estos dispositivos ha mejorado la eficacia de las técnicas de reconocimiento de gestos y la precisión del sistema de control.

Por otra parte, Jiang et al. [9] proponen un algoritmo de control adaptativo destinado a un brazo articulado 6-DOF. El interface hombre-máquina está desarrollado mediante tecnología EMG. Varias pruebas experimentales fueron realizadas con la finalidad de analizar la relación señal-ruido. Diferentes tipos de electrodos, formas y tamaños son estudiados. Zhao et al. [10] presentan una prótesis biónica basada en este tipo de sensor. El control combina técnicas de redes neuronales con una tasa de aprendizaje variable (VLR) y un modelo paramétrico autorregresivo (AR). Los resultados presentados en el documento muestran una alta capacidad de reconocimiento y una rápida velocidad de aprendizaje. Mientras que Khanna et al. [11], Hu et al. [12] o Kutilek et al. [13] desarrollan una mano biónica con múltiples grados de libertad (DOF), activada en todos los casos mediante señales EMG. Los autores proponen diferentes técnicas de control con el objetivo de que el sistema interprete lo más fielmente los diferentes movimientos del usuario.

A su vez, Beneteau et al. [14] y Benatti et al. [15] describen la implementación de un sistema de bajo coste para la adquisición y procesado de señales EMG. Los equipos desarrollados son inalámbricos mientras que el procesado de la información es efectuado por un μC MSP430-TI o un ASIC, dependiendo del caso analizado. Los resultados experimentales muestran la efectividad del hardware, durante la adquisición de datos en los distintos sistemas propuestos, así como el reconocimiento de gestos en tiempo real. Los sistemas combinan la precisión de un interface analógico con la flexibilidad de un μC de baja potencia y un alto rendimiento en

el procesamiento. Mientras que Jianting et al. [16] desarrollan un sistema de propósito general para la interacción hombre-máquina en aplicaciones biomédicas. La unidad de adquisición y análisis de señales dispone de varios canales con una resolución de μV. Plantean nuevos algoritmos de control con objeto de predecir el gesto de la muñeca de la mano a partir de la señal EMG del antebrazo.

Por otro lado, Krausz et al. [17] presentan el diseño y desarrollo de una mano biónica con 6-DOF. Este proyecto es Open Source, gratuito y de código abierto. El documento muestra el diseño de cada uno de los mecanismos de accionamiento de los dedos, así como los distintos elementos utilizados. Los autores consideraron que tanto el aspecto como las dimensiones de la mano biónica fuesen lo más parecido posible a un supuesto real. El prototipo presentado fue testeado y posteriormente fabricado con la finalidad de probar "in-situ" diferentes estrategias de control. Mientras que Yoshikawa et al. [18] presentan una estrategia de reconocimiento de gestos centrada en el cálculo vectorial. Un sistema híbrido de sensores es utilizado para determinar la información relativa a los diferentes desplazamientos de la mano. El sensor híbrido consiste en un sensor EMG y un sensor de distancia óptico. El objetivo es poder controlar un brazo robótico de forma sencilla. De acuerdo a los resultados proporcionados por los autores, el método propuesto es más fiable y preciso que el sistema basado simplemente en sensores EMG.

Otros autores como Azulay et al. [19] o Chen et al. [20] muestran la aplicación de un brazo robótico experimental, controlado por tecnología EMG, como herramienta educativa para su uso en el laboratorio de electrónica. El diseño del hardware junto con el pre/post-procesado de las bioseñales son descritas. El objetivo ha sido promover e integrar diferentes conocimientos y habilidades en el desarrollo curricular de ingeniería. El diseño simple usado en el brazo articulado limita los movimientos a emular, al mismo tiempo que muestra las diferentes posibilidades de la Ingeniería Biomédica.

A su vez Pradhan et al. [21] y Rechy-Ramírez et al. [22] exponen el sistema electrónico desarrollado para la captación de señales musculares mediante sensores EMG. De igual forma se revisa el estado de desarrollo de las bioseñales y su sistema de control. En ambos documentos se propone el diseño de un amplificador de biopotenciales EMG basado en AO's de instrumentación. Del mismo modo indican las pautas para su adecuado dimensionamiento. El sistema propuesto es testeado mediante el análisis de diferentes tipos de movimientos de la mano. Las señales son post-procesadas mediante LabVIEW y MATLAB.

III. Proyectos Open Source

El diseño y desarrollo de prótesis biónicas se encuentra en continua evolución desde sus primeras aplicaciones. Las nuevas tecnologías y los avances en diferentes disciplinas de conocimiento han permitido la construcción de múltiples prótesis con funciones y movimientos muy variados. La robótica y la impresión 3D han supuesto una gran influencia en su diseño e implementación, ver fig. 3. Todo ello ha permitido revolucionar la industria consiguiendo geométricas de alta calidad y resistencia a bajo coste.

En esta última década los grandes avances tecnológicos han permitido fabricar prótesis altamente funcionales y estéticas. Como resultado de este desarrollo, en el mercado internacional pueden encontrarse distintas marcas comerciales de prótesis de mano desarrolladas por diferentes fabricantes. Así la tabla I muestra un ejemplo de las especificaciones de algunos diseños de manos biónicas comerciales. Las prótesis analizadas reflejan una estabilidad tecnológica que se mantiene en la mayoría de los prototipos. Estas prótesis robóticas se basan en funcionalidades básicas de las manos como el agarre por medio de articulación de los dedos. Además todas ellas cuentan con una completa articulación de 5 dedos con movimientos de flexión-extensión y oposición del dedo pulgar. Sus principales sistemas de control se encuentran basados en sensores EMG superficiales mediante electrodos musculares.

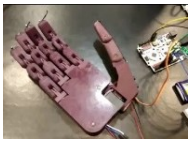
TABLA I. Especificaciones y características de diferentes manos biónicas comerciales.

Hands	Number of Digits	Number of Joint	Degrees of Freedom	Number of Actuators	Power Transmission	Coupled Finger Joints
Dextrus	5	15	5	4	Cables	MCP, PIP & DIP
InMoov	4	11	5	5	Gears	MCP, PIP & DIP
iLimb	5	11	6	5	Worm Gears	MCP & PIP
beBionic	5	11	6	5	Gears	MCP & PIP
Vicent	5	11	6	6	Gears	MCP & PIP
Michelangelo	5	6	2	2	Gears	MCP & PIP
Vanderbilt	5	9	4	4	Cables	MCP & PIP
iCub	5	19	12	9	Cables	PIP & DIP

En la actualidad existen distintas empresas y universidades que desarrollan proyectos biónicos incorporando mejoras. Una de ellas es la adaptación de la impresión 3D al diseño de diferentes prótesis biomecánicas en proyectos de código abierto (Open Source) y sin ánimo de lucro. De este modo la información es de fácil acceso (puede obtenerse en la web) y además permite ajustarse a las necesidades de cada individuo. Por el contrario la adquisición de una prótesis inteligente es un privilegio que muy pocos pueden permitirse.

En este momento uno de los tipos de prótesis que más está avanzando y evolucionando son las prótesis mioeléctricas. Los progresos en robótica y diferentes tecnologías protésicas han permitido conseguir sistemas de control dirigidos por el cuerpo y no por un sistema externo al usuario. Estas prótesis son

TABLA II. Comparación de diferentes proyectos Open Source correspondiente a manos biónicas.

					
Nombre	Brunel	Ada hand v1.2	Dextrus	Dextra	Inmoov
Grados de libertad	9-DOF	5-DOF	6-DOF	6-DOF	6-DOF
Tipo de proyecto	Open source	Open source	Open Source	Open Source Myoelectric	Open Source
Compatibilidad	Arduino IDE	Arduino IDE	Arduino IDE	Arduino IDE	Arduino IDE
Programación	Programable por USB	Programable por USB	Programable por USB y SD	PC Interface	Programable por USB
Peso	371 g	380 g	393 g	405 g	475 g
Dimensiones	198 x 127 x 66 mm	215 x 118 x 58 mm	210 x 159 x 59 mm	196 x 125 x 45 mm	
Materiales	PLA plastic, TPU	Impresión 3D	ABS	Impresión 3D, PLA o ABS	Impresión 3D ABS
Fuente de alimentación	+6/12V	+12V	+9V	+9V	+6V
Actuadores	IMU integrado de 9 ejes	5 actuadores lineales PQ12-30-12-P	5 motores Adafruit Shield	5 pololu Micro Metal Gearmotor 1000:1	5 servos HK1598B y 1 servo MG996r
Microcontrolador	SAMD21G18	ATMEGA2560	ATMEGA2560	Teensy 3.1	
PCB	Chestnut v1.0	Almond v1.2	Chestnut v1.2	Simple PCB	Nervo Board InMoov

controladas por medio de las bioseñales EMG, las cuales interpretan los diferentes movimientos musculares.

Con el fin de analizar la situación actual se ha recopilado información de diferentes proyectos Open Source. El objetivo es mostrar sus detalles, características y especificaciones más relevantes. Estos proyectos permiten fabricarse su propia prótesis a cualquier usuario e interactuar fácilmente con ella. La Tabla II presenta una comparación entre diferentes tipos de proyectos Open Source, gratuitos y de código abierto. A su vez, todos ellos son compatibles con el controlador Arduino. La finalidad es dar a conocer esta tecnología.

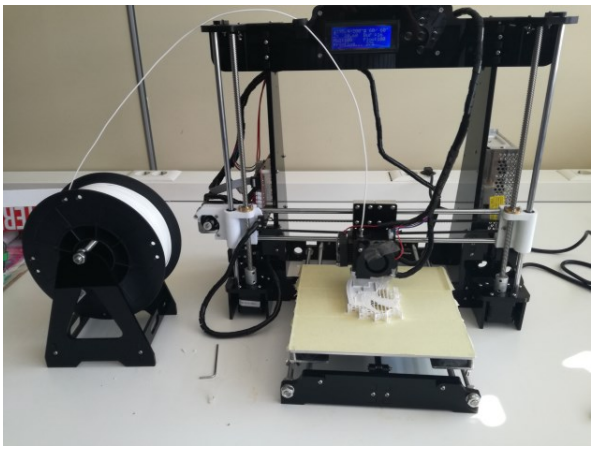


Fig. 3. Construcción de diferentes piezas del brazo biónico mediante técnicas de impresión 3D (proyecto Open Source).

La impresión 3D ha sido una tecnología que ha permitido revolucionar la industria y más concretamente la construcción de prototipos. Permitiendo diseñar elementos y productos que de otra manera serían mucho más complicados y costosos de fabricar. En el campo de la biomecánica ha sido una tecnología que ha modificado por completo el proceso de diseño y desarrollo, ver fig. 3. La impresión 3D ha permitido construir modelos complejos de una manera más sencilla y rápida, además de reducir sus costes. Así en estos últimos años han aparecido diversos proyectos a nivel internacional que utilizan esta innovadora tecnología para crear sus propios diseños. La fig. 4 muestra un detalle de los diferentes elementos que componen las articulaciones de un dedo.

A. Diseño del Brazo Robótico

En el documento aquí presentado se ha tomado como referencia el modelo InMoov, proyecto francés, basado en el desarrollo de un robot humanoide impreso en tecnología 3D, http://inmoov.fr. Este proyecto es un desarrollo Open Source que permite incorporar actualizaciones y modificaciones con objeto de mejorar el diseño. De esta forma es posible encontrar en la web multitud de recursos asociados al desarrollo de este proyecto.

El mecanismo para ejercer el movimiento de los diferentes dedos está basado en cables y muelles colocados a modo de tendones. Estos cables son activados a su vez por una polea incorporada sobre un servo Futaba S3003. El desplazamiento angular de cada accionamiento es controlado por la señal PWM proporcionada por la plataforma Arduino, ver fig. 5. También

se ha incorporado un pequeño pulsador en el extremo de cada dedo. Su propósito ha sido obtener una señal de feedback que proporcione información respecto al agarre de los diferentes objetos o el momento en el cual se ha cerrado la mano por completo.

Así pues cada uno de los dedos son accionados mediante poleas de modo que ceden o recogen cable en función del giro realizado. La principal ventaja del prototipo es su simplicidad de diseño, montaje y ensamblaje. Por el contrario el giro de la muñeca es llevado a cabo por medio de un engranaje solidario al servo. El máximo giro se corresponde con 180º, al igual que el desplazamiento del brazo humano. En la fig. 5 se aprecia un detalle de la prótesis robótica. En la imagen se observan los diferentes cables, muelles y poleas que componen el prototipo desarrollado.

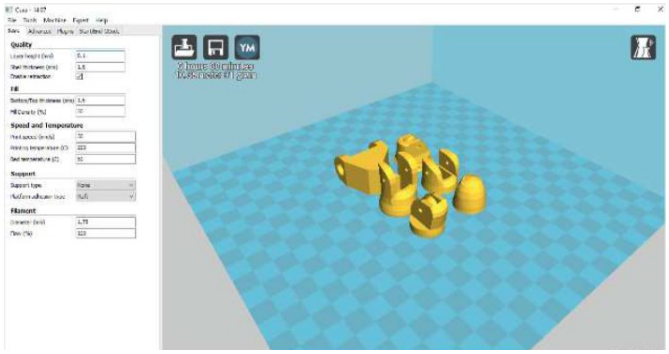


Fig. 4. Detalle y reconstrucción de los diferentes elementos que componen las uniones en uno de los dedos.

B. Sistema de Control del servo mediante Arduino.

El microcontrolador Arduino Uno es utilizado para controlar los diferentes servos Futaba S3003 del prototipo. El código implementado está basado en un mapeo realizado en la señal de entrada. Esta señal puede variar entre los valores 0 y 1023. A su vez los servos permiten un desplazamiento angular entre 0 y 180º, por lo que se ha estimado una constante de conversión. A modo de ejemplo, se muestra a continuación algunas de las líneas de código destinadas al accionamiento de uno de los dedos.

```
//Accionamiento del servo.
      #include <Servo.h>
      Servo miservo;
      const int pinServo = 9;
      const int pinPotenciometro = A0;
      int valPot = 0;
      int angulo = 0;
      void setup() {
      miservo.attach(pinServo);
      }
      void loop() {
      valPot = analogRead(pinPotenciometro);
      angulo = map(valPot, 0, 1023, 0, 180);
      miservo.write(angulo);
      delay(1500);
      }
```

C. Control Manual por Teclado.

Se ha incorporado un modo de operación manual, haciendo uso del propio teclado, para comprobar el funcionamiento adecuado del prototipo. De este modo se han utilizado los pulsos sobre las diferentes teclas para variar la consigna de posición. A continuación a modo de ejemplo se muestran varias líneas de código correspondientes a la lectura del servo en cada dedo. También se indica como modificar la consigna de posición mediante teclado.

```
//Lectura de posición de los actuadores
void loop() {
  if(input == ' '){return;}
  int tPos = thumbServo.read();
  int iPos = indexServo.read();
  int mPos = majeureServo.read();
  int rPos = ringfingerServo.read();
  int gPos = bicepServo.read();
  int hPos = shoulderServo.read();
```

```
//Modificar posición dedo mediante teclado
switch(input){
  case 't':
    tPos += stepSize;
    break;
  case 'g':
    tPos -= stepSize;
    break;
…}
…
```

IV. Reconocimiento de Gestos mediante Sensor EMG

Recientemente, en esta última década, el desarrollo de aplicaciones biomédicas y tecnologías robóticas asistidas, basadas en sensores EMG, han recibido la especial atención de los investigadores. Esto puede atribuirse a las ventajas que ofrecen este tipo de señales sobre otras bioseñales. Algunos artículos de investigación [22], [23] recogen el uso de estas señales electromiográficas (EMG) o electroencefalográficas (EEG) en el control de las prótesis biónicas.

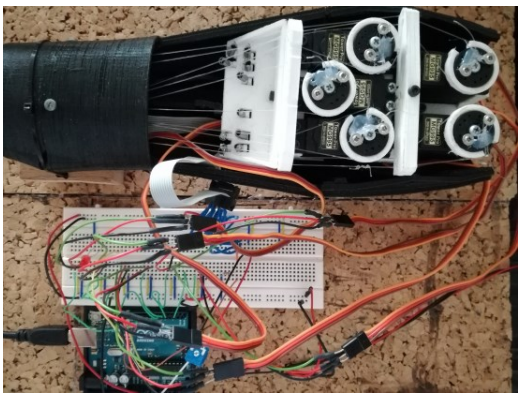


Fig. 5. Detalle de los diferentes servos, cables y muelles destinados al accionamiento de cada uno de los dedos y muñeca. El control de la prótesis es realizado por medio del controlador Arduino, quien proporciona la señal PWM para el accionamiento de los diferentes elementos.

Las técnicas electromiográficas permiten la adquisición y el análisis de los distintos impulsos bioeléctricos obtenidos como consecuencia de la actividad muscular. Ahora bien, para poder utilizar estos pequeños pulsos eléctricos resulta necesario efectuar un proceso de acondicionamiento de la señal. El propósito es inmunizar frente al ruido. De este modo es recomendable un subsistema que incorpore los siguientes bloques: pre-amplificación, filtrado para eliminar el ruido y rectificación de señal.

A. Sensores EMG Superficiales

El sensor EMG superficial es un transductor que detecta biopotenciales mediante el uso de electrodos colocados en la piel. Actualmente los electrodos Ag/AgCl son ampliamente utilizados en hospitales y laboratorios. Estos electrodos utilizan un gel electrolítico para incrementar la conductividad entre la piel y el electrodo. A pesar de su baja impedancia, este tipo de electrodos son desechables y no adecuados para mediciones a largo plazo.

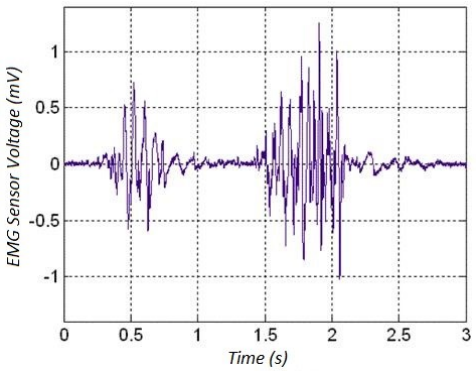


Fig. 6. Ejemplo de bioseñal EMG registrada con electrodos de Ag/AgCl en el músculo bíceps durante dos breves contracciones intermitentes.

La amplitud de los potenciales bioeléctricos varía desde los μV hasta valores del orden de los 10mV, ver fig. 6. De esta forma es necesario utilizar amplificadores de instrumentación. La señal EMG mostrada en la figura se obtuvo colocando los electrodos en los bíceps del brazo derecho y realizando una secuencia de contracción-relajación-contracción. El ruido suele acompañar a la señal obtenida y puede superarla en varios órdenes de magnitud. Un amplificador diferencial puede neutralizar buena parte del ruido ya que mide la diferencia de tensión entre los electrodos activos con respecto al considerado como referencia. Los potenciales detectados por los electrodos son posteriormente amplificados y filtrados. Por lo general en estos sistemas de acondicionamiento de señal, la ganancia del bloque amplificador es superior a 1000. El circuito PCB diseñado debe encontrarse lo más próximo posible al contacto eléctrico de los electrodos con objeto de evitar la introducción de ruido y EMI dentro del sistema.

El amplificador de instrumentación seleccionado es el INA128 (Texas Instruments), al cual se le añade un filtro paso bajo en el lazo de realimentación con objeto de eliminar la componente continua de salida, ver fig. 7. Este dispositivo posee un CMRR alto, CMRR > 120dB y un bajo voltaje de offset < 50μV. Además este dispositivo es recomendado por el fabricante para su uso en aplicaciones médicas. De acuerdo a las pruebas experimentales se adopta un ancho de banda de 20Hz a 500Hz. De este modo se considera una frecuencia de corte f_C < 1kHz. Con objeto de alcanzar los niveles de amplitud requeridos se añade una nueva etapa de amplificación. La ganancia es seleccionada para maximizar el rango dinámico a la entrada del conversor analógico digital.

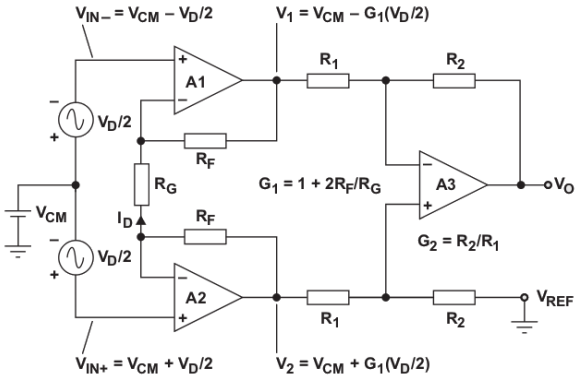


Fig. 7. Estructura y ganancia del amplificador EMG. La señal obtenida por parte de los sensores EMG posee una magnitud del orden de los mV.

La resistencia R_G permite modificar la ganancia de la etapa amplificadora. Mientras que su salida está referenciada sobre el terminal de referencia (Ref), siendo normalmente masa (V_{REF}). El voltaje aplicado sobre el terminal Ref es sumado a la salida. Aunque la mayoría de las aplicaciones no requieren ajuste de offset externo. El fabricante en su datasheet recomienda para este tipo de aplicaciones biomédicas el circuito opcional mostrado en la fig. 8. Este circuito incluye un filtro RC paso bajo para ajustar la tensión de offset.

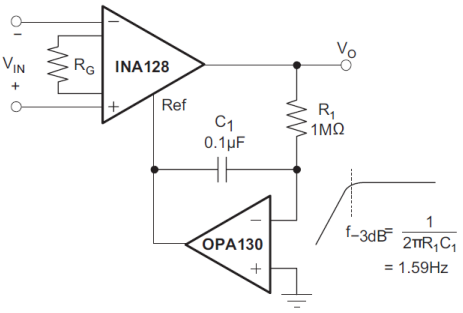


Fig. 8. Circuito recomendado por Texas Instruments para aplicaciones de bajo voltaje. La topología incluye el filtro RC asociado al terminal de referencia.

En la fig. 9 se muestra el diagrama esquemático para el procesado de la señal procedente del sensor EMG superficial. La señal obtenida, una vez filtrada y amplificada, es rectificada mediante un rectificador de precisión con objeto de cuantificar la intensidad de la señal proveniente del músculo. Esta tensión es leída por el conversor analógico-digital del Arduino. Una vez procesada esta información, el controlador genera la señal PWM destinada a cada servomecanismo para proporcionar el desplazamiento angular necesario.

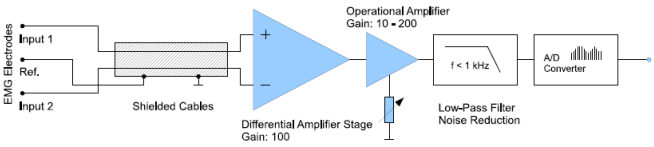


Fig. 9. Diagrama de bloques del sensor superficial EMG junto con el sistema de procesado de señal.

Al adquirir las señales bioeléctricas, uno de los mayores inconvenientes ha sido la existencia de ruido; ya que como se ha comentado, presenta amplitudes comparables con la señal EMG a medir. Ello ha dificultado el procesamiento de la información, generando en ocasiones señales no deseadas en la prótesis biónica. Por esta razón, resulta necesario minimizar o eliminar las señales indeseadas superpuestas a la tensión diferencial del amplificador, que por lo general son aleatorias y degradan su respuesta ideal, ver fig. 8.

El controlador Arduino realiza el muestreo de la tensión resultante "*analogRead(pin)*" y aplica el algoritmo de control. Los datos obtenidos por el conversor ADC son valores comprendidos entre 0 y 1023. De este modo se ha utilizado como parámetro de control la media aritmética de los datos obtenidos durante la secuencia de contracción muscular. Por otra parte, la frecuencia de muestreo ha quedado limitada por la frecuencia del μC y por el tiempo de ejecución de los comandos. Esta serie de limitaciones han condicionado la sensibilidad del prototipo desarrollado. Como posible mejora del sistema es posible incorporar un μC DSP, proporcionando más velocidad de procesamiento, y la implementación de un filtro digital en tiempo real (tipo FIR o IIR).

Para la adquisición de señales EMG es necesario utilizar al menos 3 electrodos, ver el diagrama de la fig. 10. Uno se utiliza como potencial de referencia (comúnmente va ubicado en un lugar con ausencia de musculo), los otros dos electrodos se colocan sobre las zonas musculares donde se desea medir los potenciales bioeléctricos. Pueden pertenecer al mismo músculo o diferentes, la única condición para la correcta captura de los datos es que la distancia entre los electrodos debe ser superior a > 2cm.

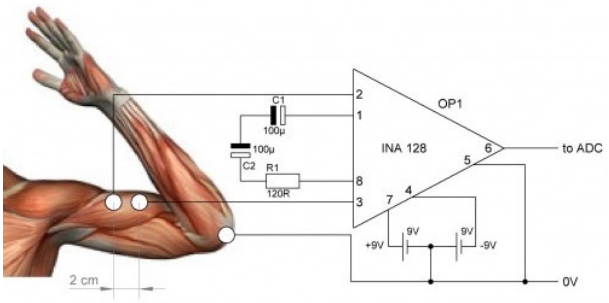


Fig. 10. Circuito de conexión del sensor EMG.

B. *Ubicación de sensores EMG*

Los sensores EMG pueden ser colocados en diferentes ubicaciones del brazo, aumentando la precisión. La fig. 11 muestra su posición en el antebrazo derecho del usuario. Se pueden elegir diferentes grupos musculares para colocar los electrodos EMG. En el caso presentado es necesaria la combinación de 5 canales. De este modo es posible descifrar las distintas señales implicadas en el movimiento individual de cada dedo. Los sensores EMG al ser dispositivos no invasivos son ideales en aplicaciones como entrenamiento, rehabilitación y control de prótesis biónicas activas.

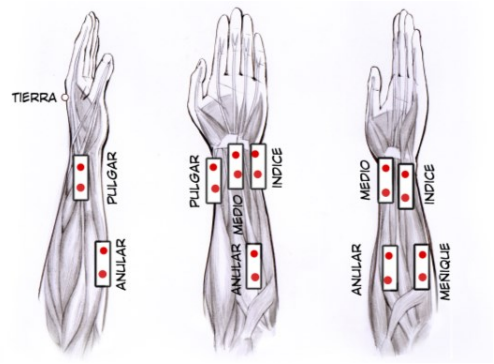


Fig. 11. Alternativas para la colocación de los diferentes sensores EMG superficiales en el antebrazo humano, [24].

C. *Control del brazo robótico mediante sensor EMG*

A modo de ejemplo se muestran algunas líneas del código asociado al desplazamiento del dedo pulgar (thumb) e índice (index) de la mano.

```
//Asignación variables
int thumbpin = 0; // analog pin for thumb sensor
int indexpin = 1; // analog pin for index sensor
…
int val1,val2,val3,val4,val5; // variable to read the value from analog

void loop()
{
  val1 = analogRead(thumbpin); // reads the value of EMG sensor
(value between 0 and 1023)
  val1= map(val1, 768, 853, 0, 179); // scale it to use it with the servo
(value between 0 and 180)
  thumbservo.write(val1); // sets the servo position according to the
scaled value
  val2 = analogRead(indexpin); // reads the value of EMG sensor
(value between 0 and 1023)
  val2= map(val2, 768, 853, 0, 179); // scale it to use it with the servo
(value between 0 and 180)
  indexservo.write(val2); // sets the servo position according to the
scaled value
…
}
```

V. CONCLUSIONES

En este documento se ha presentado el desarrollo y construcción de una prótesis biónica mediante un sistema de sensores EMG. Estos elementos han permitido optimizar la capacidad de control y facilitar su manejabilidad. Aunque su implementación ha resultado más compleja de lo esperado. El ruido ha sido uno de los mayores inconvenientes en esta aplicación. Actualmente existen en la web gran cantidad de

proyectos Open Source que permiten desarrollar prototipos de brazos articulados mediante técnicas de impresión 3D.

La realización de trabajos académicos TFG/TFM en el contexto de ciencias, tecnologías o ingenierías, ha permitido la evaluación de las competencias adquiridas por los estudiantes durante su proceso de formación universitaria. Además la construcción de pequeños proyectos ha permitido incrementar el grado de motivación e implicación del estudiante. Los objetivos iniciales se han resuelto de manera satisfactoria, obteniendo como resultado un prototipo que ha superado las expectativas iniciales y con un coste reducido.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Universidad de Zaragoza para el desarrollo del presente trabajo, a través del Programa de Innovación e Investigación Educativa (PIIDUZ 2017/18). Referencia de Proyecto: PIIDUZ_17_059.

REFERENCIAS

[1] J. Fajardo, A. Lemus and E. Rohmer. "Galileo bionic hand: sEMG activated approaches for a multifunction upper-limb prosthetic". *IEEE Central American and Panama Convention (CONCAPAN 2015). IEEExplore Digital Library.* Tegucigalpa, Honduras. November'15, pp.: 1 to 6.

[2] R. Ismail, M. Ariyanto, W. Caesarendra and A. Nurmiranto. "Development of robotic hand integrated with SimMechanics 3D animation". *International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications ISITIA'16. IEEExplore Digital Library.* 28-30 July 2016, Lombok, Indonesia; pp.: 629 to 634.

[3] H. Martin, J. Donaw, R. Kelly, Y.J. Jung and Jong-Hoon Kim. "A novel approach of prosthetic arm control using computer vision, biosignals, and motion capture". *IEEE Symposium on Computational Intelligence in Robotic Rehabilitation and Assistive Technologies, CIR2AT'14. IEEExplore Digital Library.* 9-12 December 2014. Orlando, USA. pp.: 26 to 30.

[4] J.K. Paik, B.H. Shin, Y.B. Bang and Y.B. Shim. "Development of an Anthropomorphic Robotic Arm and Hand for Interactive Humanoids". *Journal of Bionic Engineering. Elsevier ScienceDirect.* Volume: 9, Year 2012; pp.: 133 to 142.

[5] Kobayashi F., Okamoto K. and Kojima F. "Robot-human handover based on position and posture of human hand". *15th International Symposium on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS'14) and 7th International Conference on Advanced Intelligent Systems (ISIS'14). IEEExplore Digital Library.* Volume 33, Issue 4, 3-6 December 2014, Kitakyushu (Japón), pp 918 to 921.

[6] J. Cannan and H. Hu. "A Multi-sensor armband based on muscle and motion measurements". *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics ROBIO'12. IEEExplore Digital Library*. December 2012. Guangzhou, China; pp.:1098 to 1103.

[7] S. Saponara. "An actuator control unit for robotized prostethic arm with embedded energy storage". *IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering, EEEIC'15. IEEExplore Digital Library.* 10-13 June 2015. Rome, Italy; pp.: 2115 to 2118.

[8] Seong-Og Shin; Donghan Kim; Yong-Ho Seo. "Controlling Mobile Robot Using IMU and EMG Sensor-Based Gesture Recognition". *Ninth International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications. IEEExplore Digital Library.* November'14. Guangdong, China; pp.: 554 to 557.

[9] Y. Jiang, S. Sakoda, S. Hoshigawa, H. Ye, Y. Yabuki, T. Nakamura, M. Ishihara, T. Takagi, S. Takayama and H. Yokoi. "Development and evaluation of simplified EMG prosthetic hands". *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO'14. IEEExplore Digital Library.* December 2014. Bali, Indonesia; pp.: 1368 to 1373.

[10] J. Zhao, Z. Xie, L. Jiang, H. Cai, H. Liu and G. Hirzinger. "A Five-fingered Underactuated Prosthetic Hand Control Scheme". *The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics. BioRob 2006. IEEExplore Digital Library.* Pisa, Italy, 20-22 February 2006; pp.: 995 to 1000.

[11] P. Khanna, K. Singh, K.M. Bhurchandi and S. Chiddarwar. "Design analysis and development of low cost underactuated Robotic hand". *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO'16. IEEExplore Digital Library.* December 2016. Qingdao, China; pp.: 2002 to 2007.

[12] X.L. Hu, K.Y. Tong, X.J. Wei, W. Rong, E.A. Susanto and S.K. Ho. "The effects of post-stroke upper-limb training with an electromyography (EMG) driven hand robot". *Journal of Electromyography and Kinesiology. Elsevier ScienceDirect.* Volume: 23, Year 2013; pp.: 1065 to 1074.

[13] P. Kutilek, J. Hybl, J. Kauler and S. Viteckova. "Prosthetic 6-DOF arm controlled by EMG signals and multi-sensor system". *Proceedings of 15th International Conference MECHATRONIKA. IEEExplore Digital Library.* December 2012. Prague, Czech Republic; pp.: 1 to 5.

[14] A. Beneteau, G. Di Caterina, L. Petropoulakis and J.J. Soraghan. "Low-cost wireless surface EMG sensor using the MSP430 microcontroller". *6th European Embedded Design in Education and Research Conference, EDERC'14. IEEExplore Digital Library.* 11-12 September 2014. Milano, Italy; pp.: 264 to 268.

[15] S. Benatti, F. Casamassima, B. Milosevic, E. Farella, P. Schönle, S. Fateh, T. Burger, Q. Huang and L. Benini. "A Versatile Embedded Platform for EMG Acquisition and Gesture Recognition". *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems. IEEExplore Digital Library.* October 2015. Volume 9, issue: 5; pp.: 620 to 630.

[16] Jianting Fu, Jian Chen, Yizhi Shi and Yao Li. "Design of a low-cost wireless surface EMG acquisition system". *International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering, NER'13. IEEExplore Digital Library.* November 2013. San Diego, California; pp.: 699 to 702.

[17] N.E. Krausz, R.A.L. Rorrer and R.F. Weir. "Design and Fabrication of a Six Degree-of-Freedom Open Source Hand". *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. IEEExplore Digital Library.* Volume: 24, issue: 5, pp.: 562 to 572.

[18] M. Yoshikawa, Y. Taguchi, N. Kawashima, Y. Matsumoto and T. Ogasawara. "Hand motion recognition using hybrid sensors consisting of EMG sensors and optical distance sensors". *IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. IEEExplore Digital Library.* September 2012. París, France; pp.: 144 to 149.

[19] M.D. Azulay, M.I. Pisarello and J.E. Monzón. "Electromyographic control of a robotic arm for educational purposes". *3rd Middle East Conference on Biomedical Engineering, MECBME'16. IEEExplore Digital Library.* 6-7 October 2016, Beirut, Lebanon; pp.: 129 to 132.

[20] Xiang Chen, Xu Zhang, Zhang-Yan Zhao, Ji-Hai Yang, Vuokko Lantz and Kong-Qiao Wang. "Hand Gesture Recognition Research Based on Surface EMG Sensors and 2D-accelerometers". *11th IEEE International Symposium on Wearable Computers. IEEExplore Digital Library*. 11-13 October 2007, Boston, MA, USA. pp.: 11 to 14.

[21] Ashirbad Pradhan, Suraj K. Nayak, Karan Pande, Sirsendu S. Ray, Kunal Pal, Biswajeet Champaty, Arfat Anis and D.N. Tibarewala. "Acquisition and classification of EMG using a dual-channel EMG biopotential amplifier for controlling assistive devices". *IEEE Annual India Conference, INDICON'16. IEEExplore Digital Library.* December 2016. Bangalore, India; pp.: 1 to 5.

[22] E.J. Rechy-Ramirez and H. Hu. "Bio-signal based control in assistive robots: a survey". *Digital Communications and Networks. Elsevier ScienceDirect.* Volume: 1, Year 2015; pp.: 85 to 101.

[23] M.I. Rusydi, M. Sasaki, S. Huda, F. Rusydi and R.A. Putra. "Robot manipulator control using absolute encoder and electromyography signal". *Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems, ACIRS'16. IEEExplore Digital Library.* 20-22 July 2016. Tokyo, Japan; pp.: 109 to 113.

[24] Información obtenida en la siguiente dirección web (Febrero 2018): http://www.backyardbrains.cl/experiments/RobotHand

DEMOSTRADORES

Ejemplo de diseño FPGA para medidas de máximas frecuencias de operación

Carlos Jiménez Fernández, Pilar Parra Fernández, Carmen Baena Oliva, Manuel Valencia Barrero
Dpto. Tecnología Electrónica
Universidad de Sevilla
Instituto Microlectrónica de Sevilla
IMSE-CNM CSIC/US
Sevilla, España
{cjesus, parra, baena, manolov}@imse-cnm.csic.es

F. Eugenio Potestad Ordóñez
Instituto Microlectrónica de Sevilla
IMSE-CNM CSIC/US
Sevilla, España
potestad@imse-cnm.csic.es

***Abstract*—La mejor forma de prender a diseñar sistemas digitales a nivel RT es haciendo uso de ejemplos prácticos. Además, desde el punto de vista docente, cuanto más prácticos, más atractivos son para los alumnos. Pero para que un diseño sea atractivo, aunque se plantee con una baja complejidad, no es posible realizarlo en una única sesión de prácticas. En esta comunicación se presenta, a modo de demostrador, el diseño a nivel RT y su implementación en FPGA de un sistema digital que utiliza el cifrador de flujo Trivium y sobre el que se hacen medidas de su frecuencia máxima de operación. El diseño de este circuito se realiza en tres sesiones de prácticas de unas dos horas de duración cada una.**

Keywords— VHDL, diseño de sistemas digitales, FPGA, Chipscope.

I. INTRODUCTION

Las asignaturas que enseñan diseño digital en cursos avanzados de titulaciones electrónicas pueden utilizar lenguajes de descripción de hardware para la descripción de circuitos y dispositivos FPGA como tecnología para probar de forma experimental el comportamiento de los circuitos diseñados. Esta metodología tiene muchas ventajas. Una de ellas es la utilización de un único entorno de CAD para el diseño, la verificación y la programación de los dispositivos. Además este entorno de CAD es ofrecido de forma gratuita para uso docente por los fabricantes de FPGA. Otra ventaja es la disponibilidad de placas de desarrollo que incluyen, además de la FPGA, elementos de visualización e interfaz que permiten introducir valores a las entradas y ver los valores de las salidas. Por todo esto la enseñanza del diseño digital con el tándem VHDL-FPGA es una opción con un coste bajo y que, sobre todo, permite la comprobación experimental de los diseños lo que tiene un alto atractivo para los alumnos.

Esta alternativa se está aplicando en la asignatura "Diseño Digital Avanzado" [1], optativa de cuarto curso de la titulación del Grado en Electrónica Industrial impartida en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Sevilla. En esta asignatura se pretende que el alumno adquiera las competencias más importantes del diseño digital. Los únicos conocimientos previos sobre los que se construye esta asignatura son las asignaturas "Electrónica Industrial" y "Electrónica Digital", ambas de segundo curso.

La asignatura "Electrónica Industrial" es una asignatura del bloque de formación común de la rama industrial, impartida en el primer cuatrimestre del segundo curso. Es la primera asignatura que tienen los alumnos en esta titulación relacionada con la electrónica. Los contenidos de esta asignatura [2] se dividen en dos bloques: un bloque analógico y un bloque digital. En el bloque analógico se estudian las operaciones de amplificación y filtrado utilizando amplificadores operacionales. En el bloque digital se introducen los conceptos básicos de la electrónica digital, desde el álgebra de conmutación hasta el diseño de máquinas de estado, pasando por los conceptos de puertas lógicas y biestables.

La asignatura "Electrónica Digital" es una asignatura obligatoria en el plan de estudios de la titulación. Se imparte en el segundo cuatrimestre del segundo curso. Sus contenidos [3] desarrollan los iniciados en Electrónica Industrial. Incluyen características reales de las puertas lógicas y los biestables, análisis y diseño de circuitos digitales (combinacionales y secuenciales) y subsistemas combinacionales y secuenciales. En los últimos temas de la asignatura se introducen conceptos relacionados con el diseño a nivel RT (estructura de circuitos basadas en unidad de control y unidad de datos), cartas ASM y principios básicos de microprocesadores. Aunque se hacen algunas prácticas de laboratorio utilizando dispositivos FPGA, los diseños se hacen utilizando el entorno de captura de esquemas y no se utilizan lenguajes de descripción de hardware.

Con estos conocimientos previos por parte de los alumnos, en la asignatura "Diseño Digital Avanzado" se enseña a los alumnos la descripción de sistemas digitales usando el lenguaje de descripción de hardware VHDL y la forma de implementarlos sobre dispositivos FPGA (en nuestro caso de Xilinx). La asignatura se plantea de forma muy práctica, de manera que en una sesión de dos horas se combina una parte teoría con otra parte de laboratorio, en la que los alumnos comienzan haciendo el diseño de pequeños circuitos. Conforme avanza la asignatura se reduce el tiempo dedicado a la parte de teoría y los laboratorios van subiendo de complejidad, pero teniendo en cuenta siempre que la complejidad no sea muy grande para que dé tiempo al alumno a completar la práctica en la duración asignada a los laboratorios (en nuestro caso, un máximo de dos horas).

El límite de dos horas parece que obliga a no desarrollar sistemas mínimamente complejos o a relegarlos a una metodología de *aprendizaje basado en proyectos* [4][5]. Sin embargo, una solución para este problema es la reutilización de los diseños o la realización de un diseño en varias sesiones. Para que esta solución sea interesante debe tener varias características: por una parte cada una de las partes debe ser autocontenida; en cada sesión de laboratorio se debe poder conseguir un objetivo de diseño. Las distintas sesiones de laboratorio deben ir construyendo de forma paulatina la funcionalidad del sistema completo. Al diseño del sistema final se puede llegar tanto descomponiéndolo en partes más simples (*metodología del divide y vencerás*) como construyendo de poco a mucho (*metodología bottom-up*).

En esta comunicación presentamos a modo de demostrador un conjunto de tres prácticas que tienen como objetivo el análisis temporal y la medida de la máxima frecuencia de funcionamiento de un sistema digital medianamente complejo, combinando herramientas de CAD y mediciones experimentales. La realización de estas tres prácticas conlleva, además, el manejo de bloques generadores de señales de reloj de los dispositivos FPGA (para obtener relojes de frecuencias altas) y también el manejo de la herramienta Chipscope, que es un analizador lógico empotrado, con el que se pueden visualizar señales internas durante el funcionamiento de un circuito.

La estructura de esta comunicación es como sigue: en el segundo apartado se explica brevemente el diseño a realizar. En el apartado III se detallan los contenidos y los objetivos de diseño de cada una de las sesiones en las que se ha dividido el diseño así como los resultados que se pretenden obtener. Finalmente se extraen algunas conclusiones.

II. DISEÑO A REALIZAR

En este conjunto de prácticas se ha tomado como diseño base el cifrador de flujo Trivium [6]. Los cifradores de flujo son circuitos criptográficos de clave privada que se emplean para el cifrado de información bit a bit. Su función es generar una secuencia pseudo-aleatoria utilizando una clave (secreta) y un vector de inicialización (IV) que puede ser público. El mensaje se cifra haciendo la operación XOR entre el mensaje sin cifrar y la secuencia pseudo-aleatoria generada. En el receptor, el descifrado del mensaje se hace de la misma forma, mediante una operación XOR entre el mensaje cifrado y la misma secuencia pseudo-aleatoria.

Por ello el proceso de cifrado y descifrado es relativamente sencillo e igual en el cifrador y el descifrador. El mismo circuito es utilizado en el proceso de cifrado y en del descifrado. La principal dificultad a la hora de utilizar este tipo de cifradores es que deben sincronizar muy bien su funcionamiento. La variación en un solo ciclo de reloj entre cifrador y descifrador hace que el proceso de descifrado sea incorrecto. También hay que tener en cuenta que cada vez que se reinicie el funcionamiento del cifrador hay que utilizar un nuevo vector de inicialización, ya que la utilización del mismo vector de inicialización crea un importante problema de seguridad.

La estructura de circuito de los cifradores de flujo suele estar basada en registros de desplazamiento con realimentaciones no lineales. El cifrador Trivium es uno de los cifradores de flujo finalistas del Proyecto Europeo eSTREAM [7], cuyo objetivo fue seleccionar nuevas propuestas más seguras de cifradores. El cifrador Trivium está optimizado para su realización en hardware. Consta de tres registros de desplazamiento, que suman un total de 288 bits, y algunas realimentaciones (lineales y no lineales). Al registro con los 288 bits se le suele llamar registro de estado. Requiere una clave (key) de 80 bits, que debe ser secreta y conocida sólo por cifrador y descifrador, y un vector de inicialización (IV), también de 80 bits, que puede ser público. La estructura de circuito se muestra en la Fig. 1. Inicialmente el registro de estado se carga con la clave y el IV y se dejan pasar 1152 ciclos de reloj antes de poder generar una secuencia de salida (key_stream) válida. En el cifrado de un dato, el texto plano que soporta el dato es combinado (con una operación XOR) con la señal key_stream de salida del Trivium generando así la secuencia de texto cifrado. En el descifrado, este texto cifrado es combinado (también con una operación XOR) con la señal key_stream de salida del Trivium recuperando así la secuencia de texto plano original.

III. DESARROLLO DE LAS PRÁCTICAS

Las tres prácticas que se van a desarrollar tienen los siguientes objetivos parciales:

- Práctica 1: Diseño del cifrador Trivium: Verificación funcional, imposición de restricciones temporales y análisis temporal estático.
- Práctica 2: Creación de una máquina de estados que controle la carga de la clave y el IV y el funcionamiento del Trivium. Introducción de un módulo DCM (*Digital Clock Manager*) para generar una señal de reloj con distintas frecuencias. Verificación de la máxima frecuencia de funcionamiento con simulaciones post-route.
- Práctica 3: Implementación del diseño en una placa Nexys4 DDR y utilización de Chipscope para medir experimentalmente la máxima frecuencia de operación.

Para la realización de los laboratorios se utiliza la herramienta Xilinx ISE, versión 14.7, y la placa de Digilent Nexys-4 DDR.

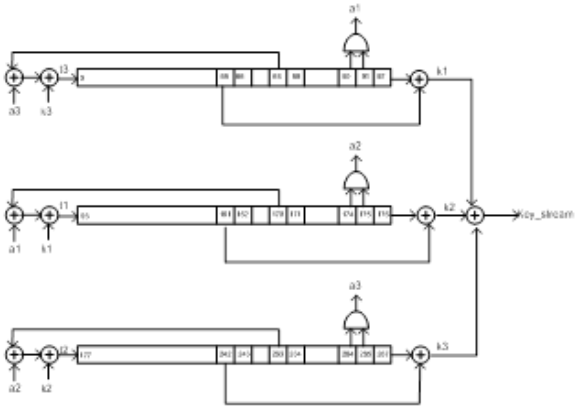


Fig. 1. Estructura de circuito del cifrador Trivium.

A. *Primera práctica: Diseño del cifrador Trivium*

A la vista de la estructura de circuito mostrada en la Fig. 1, el diseño en VHDL del Trivium es bastante sencillo. Va a tener como entradas el reloj (*clk*), una señal de reset asíncrona activa en baja (*reset*) y dos entradas de control: *ce* que va a funcionar como entrada de habilitación de funcionamiento y *ld* que va a controlar la carga de la clave y el vector de inicialización. Para simplificar el diseño, la clave (*key*) y el vector de inicialización (*IV*) van a estar definidos como constantes dentro del cifrador. Como salida tiene la señal *key_stream*, por donde sale la secuencia pseudo-aleatoria generada por el cifrador.

El código va a contener, entre otras cosas:

- La declaración de una señal *state* que contenga el registro de estados (288 bits) y la declaración de las constantes *key* e *IV* con los valores prefijados en la memoria de la práctica:

```
key = X"0F62B5085BAE0154A7FA"
iv  = X"F67A079428CF0AF960C7"
```

- La generación, de forma combinacional y concurrente de unas señales intermedias (a1, a2, a3, k1, k2, k3, t1, t2, t3) y del key_stream (ver Fig. 1):

```
k1 <= state(65) XOR state(92);
k2 <= state(161) XOR state(176);
k3 <= state(242) XOR state(287);

a1 <= state(90) AND state(91);
a2 <= state(174) AND state(175);
a3 <= state(285) AND state(286);

t1 <= k1 XOR a1 XOR state(170);
t2 <= k2 XOR a2 XOR state(263);
t3 <= k3 XOR a3 XOR state(68);

keystream <= k1 XOR k2 XOR k3;
```

- Un proceso síncrono, disparado por el flanco de subida del reloj y con reset asíncrono activo en alto. Cuando el reset esté activo se debe poner a cero todo el registro de estado. Cuando *ce* esté a cero el cifrador debe mantener su estado. Cuando *ce* esté a uno, si *ld* está a uno debe hacer la carga de *key* e *IV*, y si *ld* está a cero debe operar haciendo los desplazamientos.

La carga de la clave y del IV se realiza según las especificaciones del cifrador Trivium [6].

Además del diseño del cifrador, el alumno debe crear un test_bench para su verificación funcional. El test_bench, además de generar las señales para realizar una carga de la clave y el IV, debe hacer funcionar el cifrador durante 1000 ciclos de reloj, pararlo durante 10 ciclos (con la desactivación de la señal *ce*) y hacer que siga funcionando de forma indefinida.

Una vez realizados el diseño del cifrador Trivium y del test_bench, deberá realizar simulaciones y medidas:

- Realización de una simulación funcional.

De la simulación funcional se pide anotar los bits más significativos (en hexadecimal) del registro de estado (señal state) en el tiempo en el momento en el que tras 1000 ciclos de reloj se para el cifrador. Este valor va a servir para conocer la frecuencia máxima de operación.

- Realización de una implementación.

Y análisis de los informes ofrecidos por la herramienta de Xilinx buscando: Recursos consumidos (slices registers, luts usados como lógica, % de ocupación de la FPGA), así como la frecuencia máxima de operación y los tiempos de retraso entre las entradas y el flanco de reloj. También se pide anotar el tiempo desde el flanco de reloj hasta la salida.

- Realización de simulaciones post-route.

El objetivo es conocer el mínimo periodo de reloj del circuito. Para ello se pide realizar una primera simulación post-route con un reloj de 10 ns de periodo. Comprobar si el comportamiento es correcto comparando los valores del registro de estado con los anotados para la simulación funcional. Después se va reduciendo el periodo del reloj hasta que el contenido del registro de estados no coincida con el anotado. Se apunta el mínimo valor del periodo para el que se tiene un funcionamiento correcto, que será utilizado en próximos laboratorios.

- Imposición de restricciones temporales.

Se impone una restricción temporal sobre la señal de reloj de 5 ns de periodo. Se realiza una nueva implementación y se analizan los informes para saber si se ha podido cumplir con dicha restricción. Se vuelve a realizar una simulación post-route y se comprueba el periodo mínimo en el que el funcionamiento es correcto.

Al finalizar esta práctica no sólo se ha realizado el diseño y la verificación funcional del cifrador Trivium, sino que también se han obtenidos datos temporales con simulaciones post-route y análisis temporal estático.

B. Segunda práctica: Utilización de generadores de relojes (DCM)

Esta segunda práctica tiene como objetivo la creación de una máquina de estados que genere señales de entrada para el cifrador Trivium, así como generar la señal de reloj del Trivium mediante un MMCM. Sin embargo, para simplificar el desarrollo del laboratorio, se proporciona a los alumnos el diseño con la máquina de estados.

La máquina de estados que se les proporciona tiene la siguiente funcionalidad: realiza la carga de la clave y del IV, pone en funcionamiento al Trivium y espera que pasen 1023 ciclos de reloj, pone una salida especial a uno durante un ciclo de reloj, y hace que cifrador Trivium siga funcionando de forma continua hasta que se active una señal de reset. Esta salida especial servirá referencia para comprobar si el key_stream generado es correcto o no.

El procedimiento a seguir en este laboratorio es el siguiente:

- Realización de una simulación funcional.

Debe crear un test_bench y realizar una simulación funcional comprobando el correcto funcionamiento del Trivium (realización de la carga, operación y generación de la señal especial).

- Introducir un MMCM para generar el reloj.

Se pide crear un nuevo diseño que tendrá el mismo comportamiento y las mismas entradas y salidas que el circuito con la máquina de estados pero en el que se coloque un bloque de generación de señales de reloj MMCM (*Mixed-Mode Clock Manager*). Por lo tanto en este diseño se copia el código del diseño de la máquina de estados.

El MMCM se inserta creando una nueva fuente del tipo IP, y configurándolo de forma que tenga un reloj de entrada de 100 MHz y un reloj de salida de 200 MHz (*clkfx*). Una vez generado, se incorpora como un componente al circuito con la máquina de estados, haciendo que tanto el reloj del Trivium como el de la máquina de estados sea el reloj de salida del bloque MMCM (*clkfx)*.

- Crear un test_bench y simular funcionalmente.

De nuevo se crea un test_bench y se realiza la simulación. Un punto interesante es la comprobación de que el reloj clkfx tiene una frecuencia de 200 MHz.

- Realizar una simulación post-route.

Para poder analizar la máxima frecuencia de funcionamiento desde el punto de vista de simulación, se realiza una implementación del diseño y se realiza una simulación post-route. Pero ahora la frecuencia del reloj no se cambia en el test_bench, sino en el módulo MMCM, de forma que manteniendo la frecuencia del reloj de entrada en 100 MHz, se vaya cambiando la frecuencia de la señal de reloj *clkfx*. Con estas simulaciones se vuelve a obtener un dato de frecuencia máxima de operación del circuito.

- Comprobación de máxima frecuencia externa.

Finalmente se les propone un último análisis. Este análisis es experimental y consiste en visualizar señales de salida de la FPGA en el osciloscopio. Para ello se realiza la implementación del circuito en la placa Nexys-4 DDR y se conecta la salida *key_stream* del cifrador a un osciloscopio. Cambiando la frecuencia del reloj *clkfx* y programando la placa se puede observar la forma de onda y si es visible o no.

Los resultados de esta práctica son varios: por una parte se ha aprendido el manejo de los MMCM para genera internamente señales de reloj de frecuencias tanto inferiores como superiores a la frecuencia del reloj de entrada. Se ha vuelto a medir con simulaciones post-route la máxima frecuencia de funcionamiento y además se ha visto experimentalmente, cómo se degradan las salidas digitales cuando se aumenta la frecuencia de funcionamiento.

En la Fig. 2 se muestran capturas de simulaciones funcional y post-route a para la frecuencia de 200 MHz. Estos son los resultados que se pretenden obtener en esta práctica. Puede

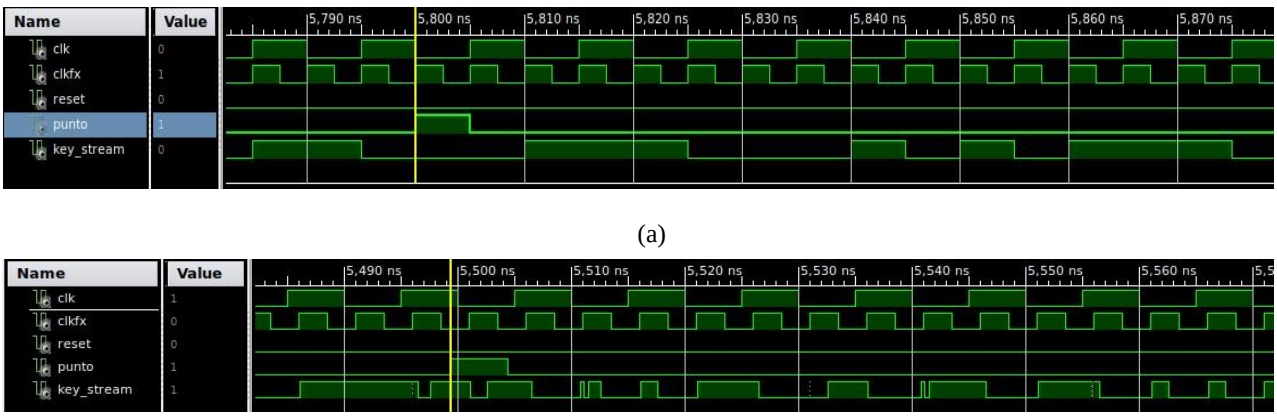


Fig. 2. Capturas del funcionamiento (a) funcional, (b) Post-route a 200MHz.

.comprobarse cómo la salida a ambas frecuencias es diferente, lo que implica un mal funcionamiento del cifrador a 200 MHz.

C. Tercera práctica: Verificación experimental de la máxima frecuencia de operación

Este laboratorio tiene como objetivo analizar las señales internas del circuito programado en la placa para comprobar experimentalmente la máxima frecuencia de operación del cifrador Trivium. Para ello se va a utilizar la herramienta de Xilinx Chipscope.

Chipscope es un analizador lógico empotrado. Permite la inclusión de puntos de prueba dentro de la propia FPGA para capturar los valores de señales muestreadas con una señal de muestreo. Los datos muestreados se almacenan en un bloque de memoria del dispositivo FPGA. Posteriormente son trasladados al ordenador y visualizados en pantalla.

Este laboratorio parte del último diseño realizado en la práctica anterior. Este diseño incluye un módulo MMCM para cambiar la frecuencia de la señal del reloj.

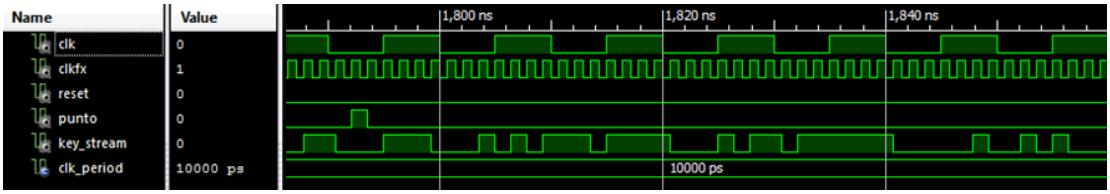
Sobre ese diseño hay que añadir un módulo de Chipscope. Para ello se añade una nueva fuente del tipo "ChipScope Definition and Connection File". La configuración de este módulo consiste básicamente en seleccionar las señales a muestrear, la señal de muestreo y el número de muestras que ve van a almacenar. Toda esta configuración se hace desde un entorno gráfico.

Una vez incluido el módulo Chipscope, los pasos a seguir son:

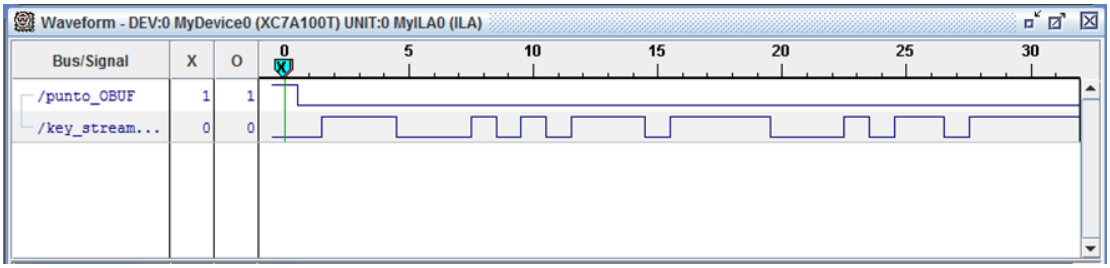
- Programación y verificación con Chipscope

La programación se hace dentro de la misma herramienta de Xilinx ISE usando la opción "Analyze Design Using Chipscope". Este programa abre una nueva interfaz gráfica en la que se pueden configurar las señales a visualizar y el modo de disparo.

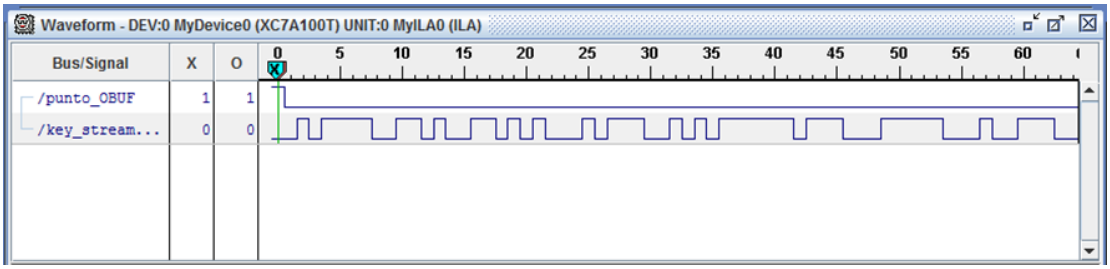
Se configura el disparo para que se produzca cuando la salida punto se ponga a '1'. La verificación del funcionamiento se hace comparando los resultados obtenidos en simulación funcional con los obtenidos mediante Chipscope. Para analizar el comportamiento a distintas frecuencias, en el módulo MCMM se cambia la frecuencia del reloj de salida y se programa la FPGA. En Chipscope se analiza la salida a partir de la puesta a '1' de la señal punto. Por la comparación con las salidas observadas en la simulación funcional puede saberse si



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. Capturas del funcionamiento (a) funcional, (b) funcionamiento correcto observado con Chipscope a 500 MHz, (c) funcionamiento incorrecto observado con Chipscope a 600 MHz.

el funcionamiento es correcto o no.

En la Fig. 3 se muestran los resultados de la salida de la simulación funcional y las salidas capturadas por Chipscope a 500 MHz y a 600 MHz. Puede observarse que a 500 MHz la salida es igual a la generada por simulación funcional, mientras que a 600 MHz la salida es totalmente diferente. Con esto se concluye que la frecuencia máxima de operación está comprendida entre los 500 y los 600 MHz.

Un punto importante es la comparación con los resultados obtenidos experimentalmente con los obtenidos mediante simulación. Experimentalmente se obtienen unas frecuencias máximas de funcionamiento mucho mayores que las obtenidas mediante simulación post-route.

IV. Conclusiones

En este artículo se ha propuesto un conjunto de tres prácticas que utilizan diseños VHDL implementados en FPGA para enseñar a los alumnos aspectos relacionados con la generación de relojes en una FPGA y con el cálculo experimental de la frecuencia máxima de operación.

El circuito escogido tiene la suficiente sencillez para que funcione a una frecuencia mayor que la del reloj de entrada, por lo que se utiliza un bloque de generación interno de señales de reloj para generar una frecuencia de reloj más alta que la frecuencia de la señal de entrada.

Los resultados son muy satisfactorios e impactantes para los alumnos, pues comprueban que de forma externa las señales que sólo pueden llegar a una frecuencia muy baja en comparación con la frecuencia máxima a la que funcionan internamente.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente soportado por los proyectos CESAR (TEC2013-45523-R), INTERVALO (TEC2016-80549-R) y LACRE (CSIC 201550E039).

Referencias

[1] Puede consultarse el proyecto docente en el enlace: http://www.us.es/estudios/grados/plan_201/asignatura_2010034 (accedido en febrero 2018).

[2] Puede consultarse el proyecto docente en el enlace: http://www.us.es/estudios/grados/plan_201/asignatura_2010011 (accedido en febrero 2018).

[3] Puede consultarse el proyecto docente en el enlace: http://www.us.es/estudios/grados/plan_201/asignatura_2010018 (accedido en febrero 2018).

[4] Julio Pastor Mendoza, José Manuel Villadangos Carrizo, Francisco Javier Rodríguez Sánchez, "Experiencias en el aprendizaje basado en proyectos del diseño de sistemas empotrados", TAEE 2016, Sevilla 22-24 de junio.

[5] Alfredo Rosado Muñoz, Manuel Bataller Mompeán y Juan Fco. Guerrero Martínez, "Aprendizaje por Proyectos: Una Aproximación Docente al Diseño Digital Basado en VHDL", Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje (IEEE-RITA), Vol. 3, Nº 2, Noviembre 2008, pp. 87-95.

[6] C. De Cannière, "Trivium: A stream cipher construction inspired by block cipher design principles," in Proc. Int. Conf. Inf. Secur., 2006, pp. 171–186, doi: 10.1007/11836810_13.

[7] eSTREAM: The ECRYPT Stream Cipher Project. Accessed: Jul. 2017.[Online]. Available: http://www.ecrypt.eu.org/stream/ (accedido en febrero 2018).

Medición de distancias como ejemplo práctico de diseño en FPGAs

,
Carlos Jiménez Fernández, Pilar Parra Fernández, Carmen Baena Oliva, Manuel Valencia Barrero
Dpto. Tecnología Electrónica
Universidad de Sevilla
Instituto Microlectrónica de Sevilla
IMSE-CNM CSIC/US
Sevilla, España
{cjesus, parra, baena, manolov}@imse-cnm.csic.es

F. Eugenio Potestad Ordóñez
Instituto Microlectrónica de Sevilla
IMSE-CNM CSIC/US
Sevilla, España
potestad@imse-cnm.csic.es

***Abstract*— El aprendizaje de diseño digital a nivel RT requiere de ejemplos prácticos y conforme se avanza en el aprendizaje se precisa que los ejemplos aumenten de complejidad. Las FPGA y las placas de desarrollo ofrecen una plataforma muy adecuada para la implementación de estos diseños. Sin embargo las sesiones de prácticas presenciales suelen tener una duración de dos horas, lo que no facilita que la complejidad de los diseños sea alta. Por ello se requiere diseños que se puedan realizar en varias sesiones y que además sean prácticos. En esta comunicación se presenta, a modo de demostrador, la construcción de un sistema medidor de distancia. Para ello se cuenta con un módulo de medición de distancias con ultrasonidos y los datos se muestran en visualizadores 7-segmentos de una placa Nexys4.**

Keywords*— *VHDL, diseño de sistemas digitales, medidor de distancia, FPGA.

I. INTRODUCCIÓN

Las asignaturas de diseño digital en cursos avanzados de titulaciones electrónicas pueden utilizar lenguajes de descripción de hardware para la descripción de circuitos y dispositivos FPGA como plataforma para probar de forma experimental el comportamiento de los circuitos diseñados. Esta metodología tiene muchas ventajas. Una de ellas es la utilización de un único entorno de CAD para el diseño, la verificación y la programación de los dispositivos. Además este software es ofrecido de forma gratuita para uso docente por los fabricantes de FPGA. Otra ventaja es la disponibilidad de placas de desarrollo, que incluyen además de la FPGA elementos de visualización e interfaz que permiten introducir valores a las entradas y ver resultados en las salidas. Por todo esto la enseñanza de diseño digital con el tándem VHDL-FPGA es una alternativa con un coste aceptable y, sobre todo, muy práctica con un alto atractivo para los alumnos.

Esta alternativa se está aplicando en la asignatura "Diseño Digital Avanzado" [1], optativa de cuarto curso de la titulación del Grado en Electrónica Industrial impartida en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Sevilla. En esta asignatura se pretende que el alumno aprenda los conceptos más importantes del diseño digital. El único apoyo que tiene esta asignatura son las asignaturas "Electrónica Industrial" y "Electrónica Digital", ambas de segundo curso.

La asignatura "Electrónica Industrial" es una asignatura del bloque de formación común de la rama industrial, impartida en el primer cuatrimestre del segundo curso. Es la primera asignatura que tienen los alumnos en esta titulación relacionada con la electrónica. Los contenidos de esta asignatura [2] constan, básicamente, de un bloque analógico y un bloque digital. En el bloque digital se introducen los conceptos básicos de la electrónica digital, desde el álgebra de conmutación hasta el diseño de máquinas de estado, pasando por los conceptos de puertas lógicas y biestables.

La asignatura "Electrónica Digital" es una asignatura obligatoria en el plan de estudios de la titulación. Se imparte en el segundo cuatrimestre del segundo curso. Sus contenidos [3] desarrollan los iniciados en Electrónica Industrial. Incluyen características reales de las puertas lógicas y los biestables, análisis y diseño de circuitos digitales (combinacionales y secuenciales) y subsistemas combinacionales y secuenciales. En los últimos temas de la asignatura se introducen conceptos relacionados con el diseño a nivel RT (estructura de circuitos basadas en unidad de control y unidad de datos), cartas ASM y principios básicos de microprocesadores.

Con estos conocimientos previos por parte de los alumnos, en la asignatura "Diseño Digital Avanzado" se enseña a los alumnos la descripción de circuitos digitales usando el lenguaje de descripción de hardware VHDL y la forma de implementarlos sobre dispositivos FPGA (en nuestro caso de Xilinx). La asignatura se plantea de forma muy práctica, de manera que los alumnos van realizando laboratorios en los que van haciendo el diseño de pequeños circuitos. Conforme avanza la asignatura estos laboratorios van subiendo un poco de complejidad, pero en el tiempo destinado a los laboratorios (un máximo de dos horas) no da tiempo a realizar diseños que tengan una mínima complejidad.

Una solución para este problema es la realización de un diseño en varias sesiones. Pero para que esta solución sea interesante debe tener varias características: por una parte cada una de las partes debe ser autocontenida: debe tener un objetivo de diseño que se pueda conseguir en una sesión de laboratorio. También debe suponer una construcción paulatina de la funcionalidad a realizar.

En este contexto, en esta comunicación presentamos a modo de demostrador un conjunto de cuatro prácticas que

tienen como objetivo la construcción de un medidor de distancia utilizando como base un dispositivo medidor de distancias por ultrasonidos y los visualizadores 7-segmentos como elemento para mostrar el resultado.

La estructura de esta comunicación es como sigue: en el segundo apartado se explica brevemente el diseño a realizar. En el apartado III se detallan los contenidos y los objetivos de cada una de las sesiones en las que se ha dividido el diseño así como los resultados que se pretenden obtener. Finalmente se extraen algunas conclusiones.

II. DISEÑO A REALIZAR

El objetivo del conjunto de prácticas que se propone es diseñar un medidor de distancia basado en un dispositivo comercial. Se trata del HC-SR04 [4] (*"Fig. 1"*) que mediante ultrasonidos es capaz de medir distancias dentro de un rango determinado y presentar las medidas realizadas en visualizadores 7-segmentos.

El sistema ha de incorporar dos modos de funcionamiento: modo continuo y modo unitario. En el modo continuo, el sistema activará el medidor de forma permanente y en todo momento se mostrarán las medidas que se estén realizando. Sin embargo, en modo unitario, el sistema realizará una única medida cada vez que se dé la orden correspondiente.

La realización del sistema completo implica el desarrollo de diversos elementos adicionales como convertidores de códigos y una unidad de control que formarán parte del que será el módulo principal del sistema.

En el diagrama de bloques del sistema medidor, véase *"Fig. 2"*, se muestra la conexión entre el módulo HC-SR04, el módulo principal y los visualizadores 7-segmentos. Respecto a las entradas externas del sistema, además de las señales de *reset* y reloj *ck*, se muestran la señal *modo* que permite elegir entre los dos modos de funcionamiento (unitario y continuo) y la señal *mide* que activa la operación de medida en el modo unitario. En cuanto a las salidas, *data_valid*, informa de que el dato mostrado en los visualizadores ya contiene la distancia medida y *alarma* es una señal que se activa cuando la distancia al obstáculo se encuentre dentro de un rango predefinido.

El módulo HS-SR04 interacciona con el módulo principal a través de dos señales, una de entrada al medidor (*trigger*) y otra de salida (*echo*). Tras recibir un pulso en la entrada *trigger* el medidor emite una señal de ultrasonidos y espera a recibir la señal retornada tras incidir en el obstáculo. Durante este tiempo de espera el medidor genera un pulso positivo por la salida *echo* que será proporcional a la distancia a medir (*"Fig. 3"*). Esta distancia está contenida en un rango entre 2cm y 4m.

El módulo principal está compuesto de una unidad de control, *control_maxsonar*, y un convertidor de código binario a 7-segmentos. La unidad de control es la encargada de suministrar la señal de *trigger* al medidor y evaluar la salida *echo* para obtener la distancia al objeto en binario así como de activar la señal *alarma*. El convertidor recibe el resultado de la distancia y lo suministra a los visualizadores.

El sistema completo es diseñado por los alumnos a lo largo de cuatro prácticas. En primer lugar, se diseña y simula la unidad *control_maxsonar* (Práctica 1). Posteriormente, en la Práctica 2, se emula mediante código VHDL el medidor HC_SR04. Esto permite disponer de señales *echo* de duración aleatoria y así poder simular medidas de distancias. En la Práctica 3, se lleva el sistema completo a la placa. Para ello, se termina de construir el módulo principal añadiendo el convertidor y eliminando el emulador del medidor, puesto que ya el módulo principal podrá interaccionar con el medidor real. Por último, en la Práctica 4 se completa el módulo principal con la salida alarma que se conectará a un zumbador.

III. DESARROLLO DE LAS PRÁCTICAS

A continuación pasamos a detallar cada una de las prácticas en que se ha descompuesto el diseño.

A. Práctica 1

En la Práctica 1 se crea la unidad de control, *control_maxsonar*. La misma tiene las siguientes entradas y salidas.

Respecto a las entradas: una señal de reloj *ck* de 100Mhz procedente de la placa de desarrollo, una señal de reinicio asíncrono activa en alta (*reset*), una señal de inicio de medición de distancia (*inicio*) y la señal *echo* procedente del módulo medidor. En cuanto a las salidas: una señal *trigger* que activa cada medición y se conectará con el módulo medidor, un bus de salida que contiene el valor de la distancia medida (*distancia*) y una señal que indica la validez de dicha medida (*data_valid*) (véase el bloque *control_maxsonar* de *"Fig. 4"*).

Las tareas que ha de realizar este módulo son las siguientes:

- Generar un pulso en la salida *trigger* cada vez que la señal *inicio* se active. Dado que *trigger* se conectará con el módulo medidor, se ha de garantizar que cumple las



Fig. 1 Medidor de distancia HC-SR04.

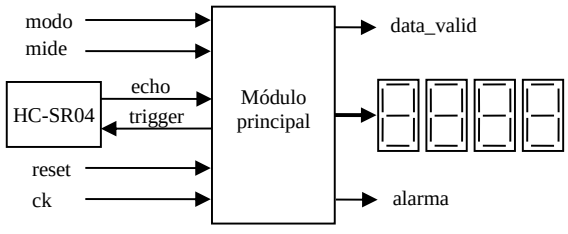


Fig. 2 Diagrama de bloques sistema medidor

especificaciones de dicho módulo (ha de ser mayor de 10µs) (*"Fig. 3"*).

- Medir el tiempo que la señal *echo* está a 1. Para ello se utilizará una señal de frecuencia adecuada a la precisión de la medida, que en nuestro caso es de 1cm. Con este fin se incorpora en el diseño un bloque IP de Xilinx para dividir la frecuencia de entrada que es excesiva. Con el reloj dividido se contará el número de ciclos que la señal *echo* está a 1 siendo ésta la medida de la distancia en centímetros.
- Activar la señal *data_valid* cuando se termine el proceso de medición de la distancia.

El alumno en la realización de la práctica tiene que determinar el número de bits necesario para la salida distancia en función de su límite superior (4m).

El diseño debe realizarse utilizando una máquina de estados cumpliendo las restricciones de síntesis. También ha de crear un testbench para simular la funcionalidad del módulo diseñado.

B. *Práctica 2*

En la Práctica 2 se diseña un modelo funcional del medidor de distancia que nos permitirá probar el correcto funcionamiento del conjunto medidor-*control_maxsonar* mediante simulación antes de pasar a la prueba con el medidor real y la placa.

Una vez que la simulación es completada con éxito los alumnos dispondrán de la placa de desarrollo Nexys4 [5] junto con el medidor real para hacer las pruebas experimentales. Para la conexión entre ambos se establece que la salida *trigger* y la entrada *echo* del control se conecten a pines determinados de la placa. La señal *ck* deberá conectarse al reloj de 100Mhz de la placa, la señal *reset* y la señal *inicio* a sendos pulsadores, la salida *distancia* a un conjunto de leds y, por último, la señal *data_valid* también a otro led.

Para probar el conjunto, el alumno deberá activar el *reset* y a continuación activar *inicio* mediante los pulsadores y esperar el encendido del led asociado a *data_valid* e interpretar en binario el valor de la distancia mostrado en los leds.

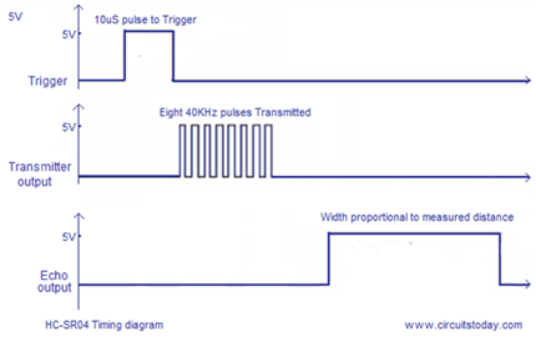


Fig. 3 Funcionamiento del medidor de distancia HC-SR04.

C. *Práctica 3*

En la Práctica 3 se realiza un diseño llamado *sistema_maxsonar* que contiene el ya realizado *control_maxsonar*, un sistema de conversión de código binario a 7-segmentos para la salida *distancia* y un circuito adicional que simplemente es un multiplexor (*mux*) para controlar la señal inicio en función de las entradas *modo* y *mide*.

Para el sistema de conversión se ha querido reutilizar un diseño que el alumno desarrolló en una práctica anterior que consistía en un convertidor BCD/7-segmentos de 4 dígitos. Por tanto, a este módulo habrá que añadirle un nuevo convertidor binario/BCD.

En la *"Fig. 4"* se muestra el diagrama de bloques del *sistema_maxsonar*.

Para probar el funcionamiento del sistema en la placa de desarrollo se utilizarán los mismos pines utilizados en la Práctica 2 para *echo* y *trigger* mientras que la entrada *mide* y *modo* se conectarán a un pulsador y a un conmutador respectivamente.

D. *Práctica 4*

En la Práctica 4 se completa el diseño añadiendo la salida *alarma*. El objeto de esta salida es poder generar una señal sonora que indique la proximidad a un objeto. Para ello se dispone de un zumbador al que conectaremos la salida *alarma*. El modo de funcionamiento es el siguiente: para que el zumbador esté apagado la salida *alarma* debe tomar el valor 1 y para que esté encendido debe tomar el valor 0.

Se considerarán cuatro casos en función de la distancia al objeto:

- Si el valor de la distancia al objeto está comprendida entre 100cm y 75cm, se producirán pitidos cortos pero distanciados en el tiempo.
- Si el valor de la distancia está en el intervalo entre 75cm y 50cm los pitidos serán algo más largos y menos distanciados.
- En el caso de que la distancia al objeto esté entre 50cm y 25cm, los pitidos estarán aún menos distanciados.
- Finalmente, si la distancia es inferior a 10cm, el

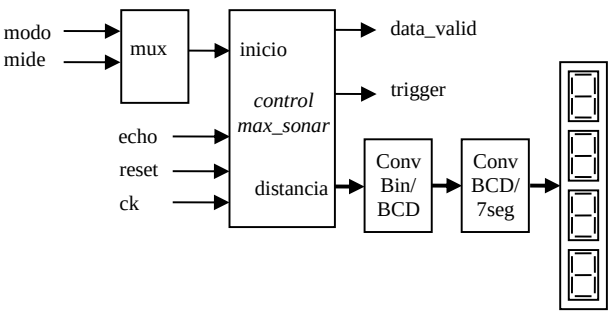


Fig. 4 Diagrama de bloques detallado del sistema max_sonar

pitido habrá de ser continuo.

Para conseguir estos objetivos, el alumno debe modificar el código anterior y programar la placa comprobando posteriormente el funcionamiento del sistema completo.

En las *"Fig. 5, 6 y 7"* se presentan unas imágenes obtenidas en el laboratorio. En la *"Fig. 5"* se muestran los módulos que se conectan a la placa de desarrollo: el medidor de distancia HC_SR04 y el zumbador utilizado para generar la señal sonora. Las otras dos imágenes (*"Fig. 6"* y *"Fig. 7"*) corresponden a fotografías que fueron tomadas en el laboratorio para ilustrar el resultado al que llegaron los alumnos tras el desarrollo de las prácticas. En concreto, la *"Fig. 6"* es el resultado de la Práctica 3, donde la distancia al objeto se muestra en los 4 visualizadores 7-segmentos y la *"Fig. 7"* corresponde al resultado obtenido tras la realización de la Práctica 4 dado que se incorpora el módulo zumbador.

IV. Conclusiones

Con este conjunto de prácticas hemos conseguido que el alumno se enfrente a realizar un diseño de cierta complejidad mediante la descomposición de éste en diseños más sencillos. También se ha conseguido el objetivo de que cada una de las partes en que se ha descompuesto el diseño corresponda a una única sesión de laboratorio. Además se incorpora, en cada caso, el proceso completo de diseño, es decir, la escritura del código VHDL, depuración de errores, escritura del fichero de estímulos (*testbench*) que permite la simulación funcional y, en su caso, la implementación en la placa y su comprobación experimental.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente soportado por los proyectos CESAR (TEC2013-45523-R), INTERVALO (TEC2016-80549-R) y LACRE (CSIC 201550E039).

Referencias

[1] Puede consultarse el proyecto docente en el enlace: http://www.us.es/estudios/grados/plan_201/asignatura_2010034 (accedido en febrero 2018).

[2] Puede consultarse el proyecto docente en el enlace: http://www.us.es/estudios/grados/plan_201/asignatura_2010011 (accedido en febrero 2018).

[3] Puede consultarse el proyecto docente en el enlace: http://www.us.es/estudios/grados/plan_201/asignatura_2010018 (accedido en febrero 2018).

[4] Pueden consultarse las especificaciones del medidor HC-SR04 en http://www.micropik.com/PDF/HCSR04.pdf

[5] Pueden consultarse las especificaciones de la placa de desarrollo Nexys4 en:https://reference.digilentinc.com/reference/programmable-logic/nexys-4-ddr/reference-manual

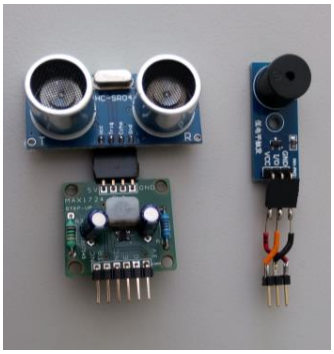


Fig 5 Medidor de distancia (izq) y zumbador (dcha).

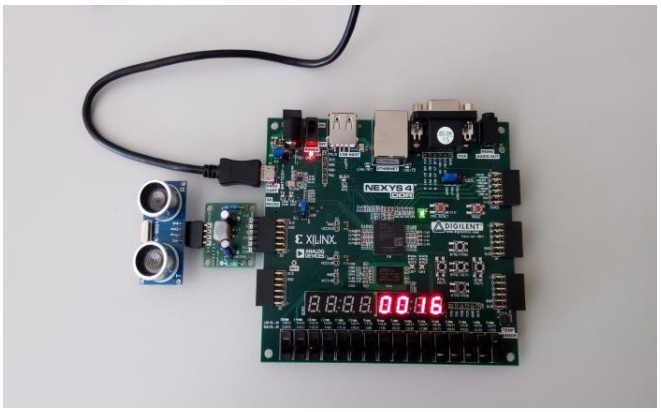


Fig. 6 Placa de desarrollo y medidor. Resultado tras Práctica 3.

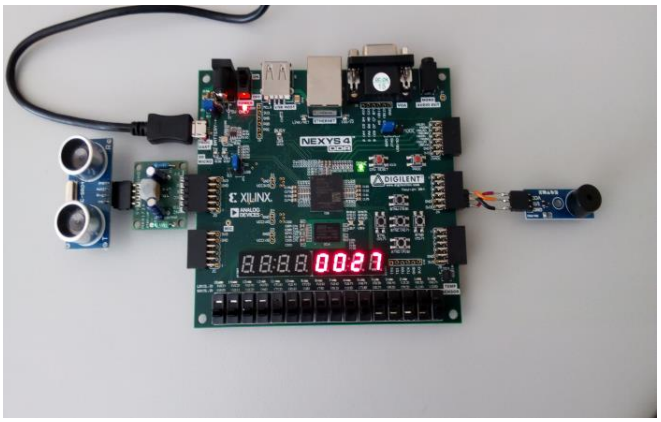


Fig. 7 Placa de desarrollo, medidor y zumbador. Resultado tras Práctica 4.

WebLab-Boole-Deusto: Plataforma web para el diseño y test en laboratorio remoto de sistemas digitales combinacionales básicos

Javier García-Zubía, Eneko Cruz, Luis Rodríguez Gil, Unai Hernández Jayo, Ignacio Angulo Martínez, Pablo Orduña
Facultad de ingeniería, Universidad de Deusto
Avda. Universidades 24, 48007 Bilbao, España
zubia@deusto.es

Borja Sotomayor Basilio
Departamento Computer Science, University of Chicago
1100 East 58th Street
Chicago, IL60637, USA
borja@cs.uchicago.edu

***Abstract*— En el ámbito de la minimización de funciones booleanas y de su diseño mediante puertas AND-OR-NOT existe un buen número de plataformas y programas informáticos específicos. La plataforma WebLab-Boole-Deusto presenta dos características novedosas frente a las anteriores ya que por un lado es una plataforma web y por tanto el usuario no debe descargarse ningún software, y por otro lado permite al usuario no solo diseñar el circuito digital sino también probarlo en un laboratorio remoto basado en una FPGA/CPLD que le ofrece por ahora interruptores, pulsadores, leds y 7-segmentos.**

Keywords*— *Circuitos digitales, minimización booleana, laboratorios remotos

I. INTRODUCCIÓN

La asignatura de Electrónica Digital forma parte del curriculum de diversos grados en ingeniería y en otros ámbitos técnicos. Así pues, cualquier aportación en esta área puede ser interesante para dicha comunidad.

Los circuitos electrónicos digitales se dividen en combinacionales y secuenciales, y cada uno de estos además puede ser dividido en dos grupos: a nivel de puerta lógica (bit-level) o a nivel funcional (word-level). Los circuitos a nivel de bit están implementados exclusivamente con puertas lógicas AND-OR-NOT, mientras que los circuitos a nivel de palabra se implementan principalmente con bloques funcionales tipo CI 74XX. La Fig. 1 muestra dos ejemplos de ambos tipos de circuitos.

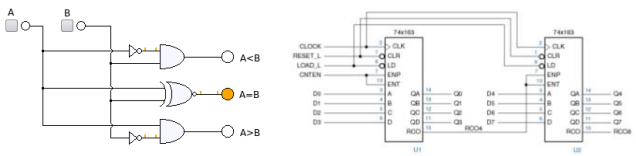


Fig. 1. Circuitos digitales

La herramienta WebLab-Boole-Deusto presentada en este trabajo está orientada al diseño de circuitos combinacionales a nivel de puerta lógica, aunque también podría extenderse a sistemas secuenciales. El proceso de diseño de estos circuitos sigue una metodología paso a paso muy asentada y descrita en los manuales de la asignatura. La Fig. 2 muestra claramente este proceso: crear la tabla de verdad, escribir la formas canónicas booleanas, dibujar los mapas VK, obtener las expresiones mínimas simplificadas y dibujar el circuito digital con puertas lógicas AND-OR-NOT.

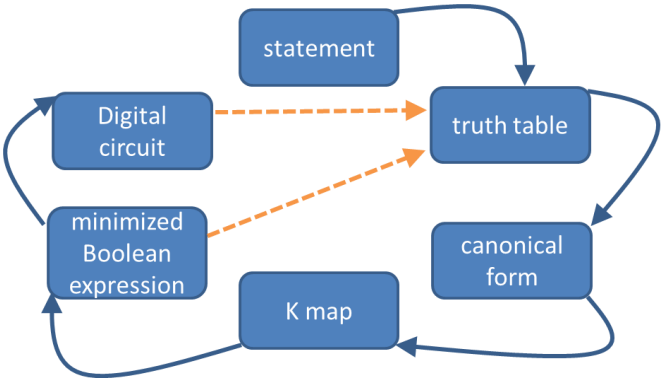


Fig. 2. Diseño de circuitos digitales combinacioanles con puertas lógicas

En la Fig. 2 las líneas continuas describen el proceso de diseño, mientras que las líneas discontinuas muestran el proceso básico de análisis. Cada paso de diseño (o análisis) implica que el alumno debe aplicar un método claro y bien conocido: para obtener la tabla de verdad los alumnos deben describir el comportamiento del ejercicio usando solo 0 y 1; el diagrama o mapa VK es la representación gráfica de la tabla de verdad de forma que está pueda ser simplificada; para minimizar el VK el alumno debe aplicar un algoritmo no del todo trivial que se basa en el dibujo de lazos; y finalmente el circuito digital expresa mediante símbolos gráficos las expresiones booleanas mínimas obtenidas de los mapas VK.

WebLab-Boole-Deusto (WBD)ayuda a los estudiantes a aprender cómo completar los pasos anteriores de diseño, y lo hace paso por paso, sin pasar directamente de la tabla de verdad al circuito digital como hacen otras herramientas de diseño

digital. Adicionalmente, WBD es capaz de implementar el sistema diseñado para que los alumnos puedan testear la bondad del circuito diseñado. Dicha implementación se basa en una FPGA y se ofrece como un laboratorio remoto. Es decir, el alumno no necesita montar un circuito o grabar una FPGA, simplemente necesita disponer de una conexión a internet para acceder al laboratorio remoto y completar la experiencia.

Antes de describir la herramienta WebLab-Boole-Deusto es importante remarcar que se trata de una herramienta didáctica, orientada al aula y los alumnos y no a la industria y los profesionales. En la industria los profesionales no usan CI de puertas lógicas, sino que directamente programan en VHDL la configuración de las FPGA utilizadas (o programan en C los microcontroladores). En educación al menos hasta el momento, es importante que el alumno entienda el concepto de puerta lógica y su utilización para implementar circuitos digitales.

El trabajo consiste fundamentalmente en presentar la herramienta y su uso para que los profesores involucrados puedan determinar su utilidad en el aula.

II. Descripción de WebLab-Boole-Deusto

WebLab-Boole-Deusto es una aplicación web accesible desde cualquier tipo de dispositivo y navegador web, y está disponible en https://test.labsland.com/boolewrapper/. Para describir WBD lo mejor es hacerlo a través de un ejemplo.

El ejercicio a completar es un clásico de la electrónica digital: Diseñar un decodificador BCD-7 segmentos activo por nivel bajo y dotado de línea de enable activa por nivel alto.

El primer paso es determinar el número de variables de entrada y de salida: 4 entradas (e3-e0) y 8 salidas (segmentos a-f y enable), como muestra la Fig. 3.

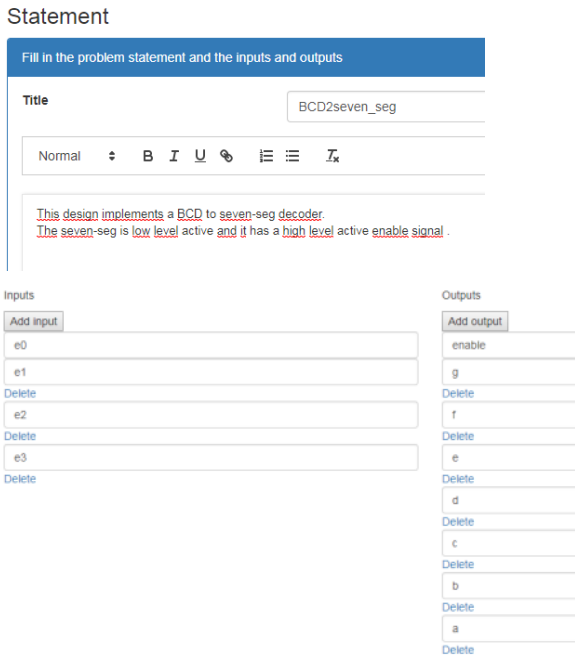
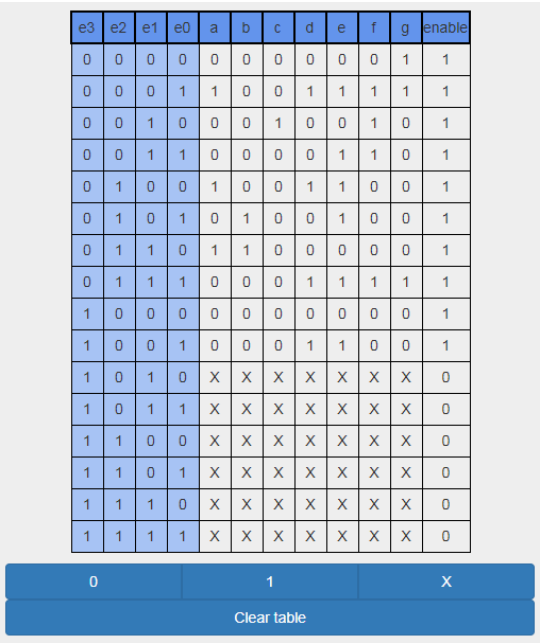


Fig. 3. Decodificador BCD-7 segmentos

La Fig. 4 muestra el siguiente paso, consistente en crear la tabla de verdad usando simplemente el ratón. En este ejemplo las entradas son activas por nivel alto y las salidas, por bajo.

En el siguiente paso, Fig. 5, los alumnos pueden obtener opcionalmente la forma canónica correspondiente a cada columna resultado del sistema digital. Este paso es relevante porque se pasa de una descripción basada en 1, 0 y X a una basada en el álgebra de Boole (Teorema de Shannon), tanto en forma de minitérminos como de maxitérminos.



e3	e2	e1	e0	a	b	c	d	e	f	g	enable
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1
0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1
0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1
0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1
0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1
0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1
0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1
1	0	1	0	X	X	X	X	X	X	X	0
1	0	1	1	X	X	X	X	X	X	X	0
1	1	0	0	X	X	X	X	X	X	X	0
1	1	0	1	X	X	X	X	X	X	X	0
1	1	1	0	X	X	X	X	X	X	X	0
1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	0

Fig. 4. Tabla de verdad del decodificador BCD-7 segmentos



Fig. 5. Formas canónicas booleanas del decodificador BCD-7 segmentos

Cada columna de la tabla de verdad (o cada forma canónica) puede convertirse en un diagrama VK que es usado para minimizar la expresión booleana correspondiente. La Fig. 6 nos muestra el diagrama VK correspondiente al segmento f de la tabla de verdad. La expresión booleana minimizada o simplificada se encuentra debajo del VK, y en esta expresión cada término tiene un color, y cada color se corresponde con un lazo en el VK del WBD. Para obtener las expresiones de otros segmentos simplemente hay que hacer clic en las flechas situadas a derecha e izquierda de la imagen. Además, y como se puede

ver en la Fig. 6, la expresión mínima puede ser ocultada para que la obtenga el alumno antes de verla.

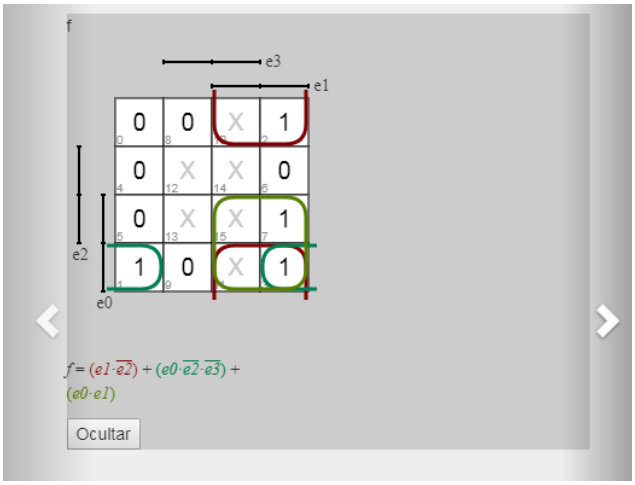


Fig. 6. VK y expresión minimizada del segmento f del decodificador BCD-7 segmentos

La Fig. 7 muestra el circuito digital implementado con puertas AND-OR-NOT del decodificador BCD-7 segmentos.

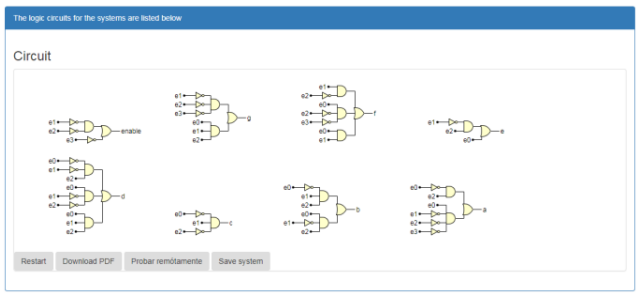


Fig. 7. Circuito digital del decodificador BCD-7 segmentos

En este momento, y llegados a este punto, los alumnos deberían ir al laboratorio para implementar el circuito anterior usando circuitos integrados 7404 (NOT), 7408 (AND) y 7432 (OR). De esta manera el alumno podrá montar y probar por sí mismo un circuito digital real.

Frente a esta opción o como complemento a ella, el alumno puede utilizar un simulador tipo Proteus o Falstad o un laboratorio remoto. La opción de este trabajo se basa en el uso de un laboratorio remoto, WebLab-Deusto.

Un laboratorio remoto permite que el alumno tenga una experiencia similar a la que tendría en un laboratorio clásico o manual pero sin estar en él, utilizando una conexión a Internet como sus manos y ojos. Los laboratorios remotos tienen muchas ventajas y desventajas y existen múltiples estudios que avalan su utilidad o la critican, pero este no es el objetivo de este trabajo. Este no es otro que mostrar otro caso de uso a la comunidad universitaria. El alumno en este caso puede probar (no montar) un circuito digital real.

El laboratorio remoto WebLab-Deusto-FPGA dispone de varias entradas y salidas, más concretamente dispone en la entrada de 10 interruptores, cuatro pulsadores y un clock de frecuencia seleccionable, y en la salida dispone de 8 diodos led y cuatro 7-segmentos multiplexados con sus correspondientes líneas de enable. La Fig. 8 muestra la asignación que se ha hecho mediante arrastre en el interface: las entradas han sido asignadas a los interruptores (podrían haber estado asignadas a los pulsadores), y los segmentos de salida se han asignado a los correspondientes segmentos.



Fig. 8. Asignación de pines de entrada y salida del decodificador BCD-7 segmentos

Una vez hecha la anterior asignación, los alumnos deben descargar el fichero VHDL creado por la herramienta. Este fichero contiene la descripción VHDL del circuito digital creado. En ningún caso es relevante ahora si el alumno entiende o no el fichero recién creado, aunque lo es fácilmente y bien puede ser servir al profesor para introducir este tema. La Fig. 9 muestra el código VHDL generado para este ejemplo.

```
        led0 : inout std_logic;
        led1 : inout std_logic;
        led2 : inout std_logic;
        led3 : inout std_logic;
        led4 : inout std_logic;
        led5 : inout std_logic;
        led6 : inout std_logic;
        led7 : inout std_logic;
        ena0 : inout std_logic;
        ena1 : inout std_logic;
        ena3 : inout std_logic;
        dot : inout std_logic
        );
end base;

architecture behavioral of base is
    begin
        ena2<=( not ( swi1 ) and not ( swi2 ) ) or ( not ( swi3 ) );
        seg0<=( not ( swi1 ) and not ( swi2 ) and not ( swi3 ) ) or ( swi0 and swi1 and swi2 );
        seg1<=( swi1 and not ( swi2 ) ) or ( swi0 and not ( swi2 ) and not ( swi3 ) ) or ( swi0 a
        seg2<=( not ( swi1 ) and swi2 ) or ( swi0 );
        seg3<=( not ( swi0 ) and not ( swi1 ) and swi2 ) or ( swi0 and not ( swi1 ) and not ( swi
        seg4<=( not ( swi0 ) and swi1 and not ( swi2 ) );
        seg5<=( not ( swi0 ) and swi1 and swi2 ) or ( swi0 and not ( swi1 ) and swi2 );
        seg6<=( not ( swi0 ) and swi2 ) or ( swi0 and not ( swi1 ) and not ( swi2 ) and not ( swi
end behavioral;
```

Fig. 9. Descripción VHDL del decodificador BCD-7 segmentos

El siguiente paso consiste en acceder al WebLab-Deusto. En este momento la página web le solicita un user/pass y el alumno bien puede introducir la suya, si es que la tiene, o utilizar demo/demo. Una vez dentro del experimento remoto (WebLab-Deusto-PLD o WebLab-Deusto-FPGA) es necesario indicarle al mismo con qué fichero debe experimentar (BCD2seven_seg.vhd).

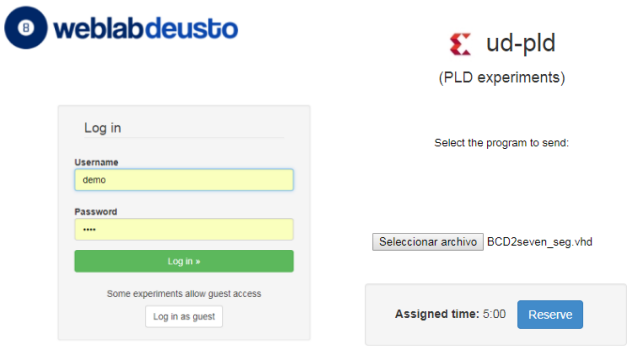


Fig. 10. Acceso a WebLab-Deusto

Al activar la opción de Reservar el fichero .vhd es enviado al servidor de WebLab-Deusto y ahí comienza el procesado típico de un fichero de este tipo: síntesis (Fig. 11), implementación, generación de fichero .bit y programación final del dispositivo. Al acabar el proceso, que bien puede llevar unos minutos, el alumno toma el control del circuito digital.



Fig. 11. Proceso de síntesis del decodificador BCD-7 segmentos en VHDL

Antes de seguir cabe destacar que no es objetivo en absoluto de esta herramienta el entrenar al alumno en el diseño de sistemas digitales en VHDL. En WebLab-Boole-Deusto el VHDL y la FPGA son meros instrumentos para facilitar la experimentación del alumno, y no son objeto de aprendizaje. La plataforma WebLab-Deusto cuenta con otro laboratorio orientado al diseño con VHDL y FPGA que actualmente se encuentra bajo rediseño.

Volviendo a lo anterior, el alumno tiene el control de las entradas, y al cambiar sus valores podrá ver el efecto de estos cambios en las salidas. La Fig. 12 muestra dos situaciones distintas en la entrada. La primera es 0000 (ver que los cuatro interruptores están a 0) y la segunda, 0101 (ver que los interruptores indican 0101).

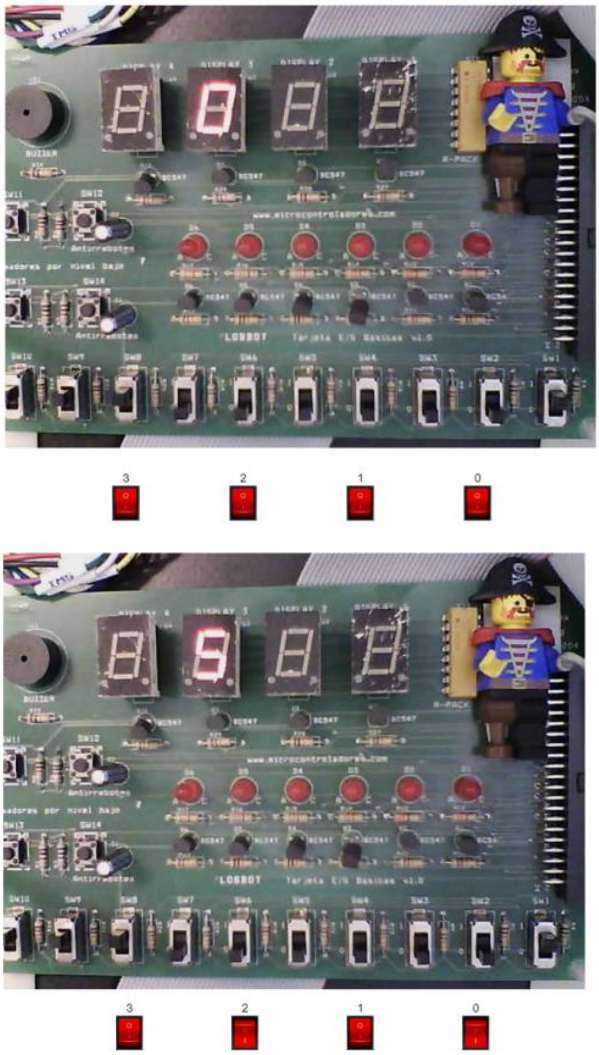


Fig. 12. Experimentación 0000 y 0101 en el decodificador BCD-7 segmentos en VHDL

En este momento el alumno puede probar todas las combinaciones hasta quedar satisfecho con su diseño, o puede encontrar algún error que le haga reconsiderar su diseño inicial, con el fin de obtener un comportamiento satisfactorio en un nuevo acceso al laboratorio remoto.

Por último cabe destacar que el usuario puede guardar y cargar los sistemas digitales creados con anterioridad.

III. Comparativa con otras herramientas similares

Actualmente hay centenares de minimizadores booleanos pero la mayoría de ellos tiene alguno de los problemas siguientes:

- La mayoría está orientada solo a la minimización booleana, o a la simulación de circuitos digitales, o pocas veces está orientada al proceso completo de diseño.
- No son aplicaciones web, y muchos son programas de escritorio ejecutables.

- Las aplicaciones que son web pueden estar basadas en tecnologías obsoletas, fundamentalmente Java o Flash.
- El soporte gráfico no es habitual, y lo normal es que la introducción de las funciones a minimizar esté basada en minitérminos/maxitérminos.
- Muchas de ellas no permiten al alumno comprobar su propia solución, la herramienta simplemente ofrece la suya.
- No tienen conexión a un laboratorio remoto para poder experimentar con el sistema en realidad, simplemente entregan al alumno las expresiones booleanas o una simulación gráfica.

WebLab-Boole-Deusto es una herramienta web, accesible desde cualquier dispositivo usando cualquier navegador y bajo cualquier sistema operativo, su interface es gráfico e incluye el acceso a un laboratorio remoto. WBD está integrado en WebLab-Deusto y por tanto ofrece al profesor las ventajas propias de un RMLS (Remote Lab Management System) que son explicadas en una sección posterior.

Desde nuestro conocimiento no existe otra herramienta similar disponible, excepto Boole-Deusto [1], predecesora de la actual WBD.

La herramienta Boole-Deusto, descrita al comienzo como calculadora booleana, fue diseñada antes del año 2000 y ha conocido diferentes versiones, y en esencia es similar a la actual, incluyendo el laboratorio remoto, pero tiene una desventaja clara: se trata de una aplicación de escritorio que el alumno debe descargar y ejecutar en su ordenador sin más garantía que el texto que la acompaña. A cambio tiene otras ventajas como el diseño de autómatas finitos deterministas (FSM) o la opción de que el alumno obtenga la expresión mínima por sí mismo y la compare con la calculada por la herramienta.

La anterior afirmación debería ir acompañada de un análisis más detallado de otras herramientas, pero esto no es tan fácil ya que el número de herramientas es muy elevado. Por ejemplo introducir en google "karnaguh online" ofrece 180.000 resultados. El primero de ellos, http://www.32x8.com/, en efecto es un minimizador online, aplicación web, y se parece al WBD: dada una tabla ofrece una minimización y un circuito lógico, pero no permite describir más de una columna resultado en la tabla de verdad ni acceder a un laboratorio remoto, además de otras muchas diferencias (Ver Fig. 13).

Softonic ofrece dos herramientas en su portal, Karnaugh Minimizer (https://karnaugh-minimizer.softonic.com/) y Karnaugh Calculator y ambas son ficheros descargables. Otra opción sería usar Proteus de LabCenter (https://www.labcenter.com/), pero esta conocida herramienta está orientada a la captura y simulación de circuitos analógicos y digitales, y no a mostrar las fases de diseño digital. Es una herramienta profesional, y no está orientada siempre a las necesidades del alumno, y además no cuenta con conexión a laboratorio remoto, sino que su esfuerzo se centra en el simulador.

Hay que destacar que WBD no busca "competir" con esas herramientas ni con los simuladores u otros enfoques similares, sino que busca ser una ayuda para el profesor y el alumno en la tarea de enseñanza-aprendizaje.

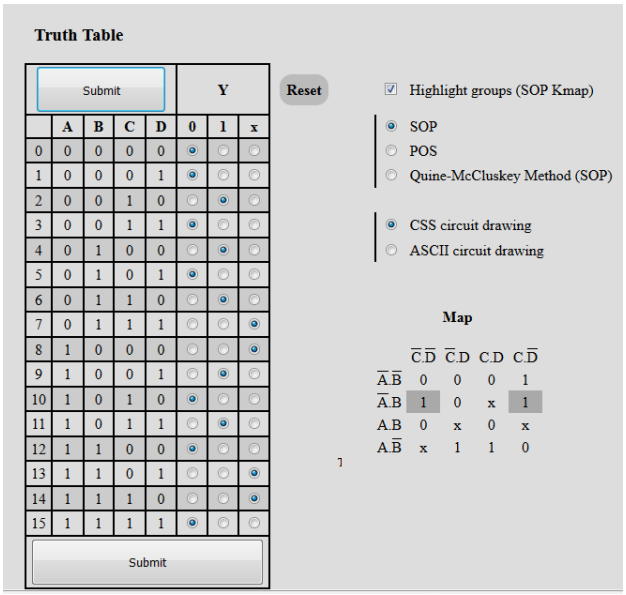


Fig. 13. Herramienta alternativa a WBD

IV. WEBLAB-DEUSTO RLMS

Como ya se ha indicado, el laboratorio remoto integrado en WBD se ofrece bajo la gestión de WebLab-Deusto. WebLab-Deusto es una plataforma que ofrece diferentes laboratorios remotos –robots, ARM,Arquímedes, VISIR, etc- con una serie de ventajas.

El profesor puede organizar los grupos de alumnos que podrán acceder a WebLab-Deusto-FPGA o WebLab-Deusto-PLD desde WebLab-Boole-Deusto, o podrá saber cuántas veces se ha conectado cada alumno, o cuándo lo hecho. Incluso puede saber qué fichero ha subido a la plataforma, de manera que el profesor puede apreciar y evaluar el esfuerzo y aprendizaje del alumno.

La Fig. 14 nos muestra algunos datos generales de uso de WebLab-Deusto por parte de una clase en la asignatura de Electrónica en el primer parcial del curso 2017-2018.

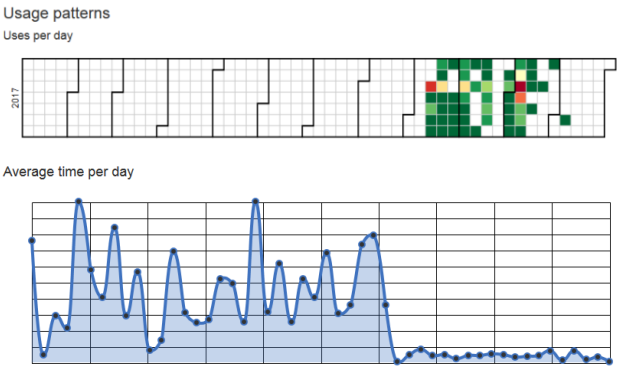


Fig. 14. Estadística de uso de WEbLab-Deusto para PLD y FPGA

La Fig. 15 muestra sin embargo una sesión en particular de una alumna, donde el profesor no solo puede ver las acciones de la misma, sino que también puede acceder a los ficheros enviados al laboratorio remoto.

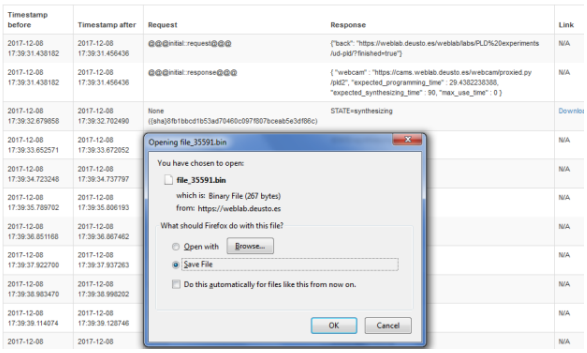


Fig. 15. Acceso detallado a WebLab-Deusto-PLD de una alumna

El profesor valora mucho este tipo datos para poder establecer técnicas de Learning Analytics y similares.

V. Conclusión y Trabajo Futuro

La herramienta WebLab-Boole-Deusto permite al alumno y al profesor el diseño paso a paso de un circuito digital combinacional a nivel de bit y su prueba real en un laboratorio remoto. WBD es una herramienta web diseñada bajo el paradigma html5.

El trabajo futuro se orienta hacia la medida de la usabilidad bajo UMUX y hacia la extensión de su funcionalidad, sobre todo hacia la integración de diseño de autómatas (FSM).

Referencias

[1] J. Garcia-Zubia. “Educational software for digital electronics: BOOLE-DEUSTO”, Proc. IEEE International Conference on Microelectronic Systems Education (IEEE MSE), pp. 20-22, 2003.

Entrenador de comunicaciones digitales basado en FPGA controlado mediante LabVIEW

Oswaldo González, Manuel Rodríguez, Alejandro Ayala, Silvestre Rodríguez, Beatriz R. Mendoza
Dpto. Ingeniería Industrial, Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología, Universidad de La Laguna
Avda. Astrofísico Francisco Sánchdez, S/N, 38203 La Laguna, Tenerife, Islas Canarias
Email: oghdez@ull.es, mrvalido@ull.es, aayala@ull.es, srdguezp@ull.es, bmendoza@ull.es

***Abstract*—This paper describes the design and implementation on FPGA (Field Programmable Gate Array) of a training system for learning the basics about digital communications. The developed system is able to generate the main digital modulated signals (ASK, FSK, BPSK, M-PSK, M-QAM) and it also contains an optimum receiver for demodulating these signals when they are corrupted by AWGN (Additive White Gaussian Noise). An AWGN generator is included into the same FPGA in case an external one is not available. Moreover, a software tool developed in LabVIEW is provided to analyze the different signals at the modulator and the demodulator. This work constitutes a tool for helping students to improve their understanding and learning about digital communication. Nevertheless, its design and implementation could also be focused as a Final Graduate Project for a bachelor's degree in Electronics Engineerging. The project covers several topics on communications, signal processing, digital-to-analog conversion and programming in LabVIEW, as well as design and synthesis over logic devices by using hardware description languages. Therefore, it allows the student to go into the previous topics in a greater depth and it prepares him/her for applying the knowledge of them in the achievement of a specific objective. On the other hand, the project constitutes the solution of a non-trivial problem by using digital techniques, then making the student more confident to cope with new challenges in the future. From an educational point of view, this tool has been used in digital communication courses to assess its ability to improve students' learning. It has been demonstrated an above 30 % enhancent on academic students' marks in digital communication topics since the introduction of practical sessions with this tool as part of subject program.**

I. Introducción

Los entrenadores de comunicaciones configuran una herramienta muy eficiente para facilitar a los alumnos la comprensión de los aspectos relacionados con los sistemas de comunicación [1]–[3], al permitirles trabajar con dispositivos que generan y procesan señales reales y no meramente con modelos matemáticos e ilustraciones expuestos en una pizarra o diapositiva. Si estos módulos *hardware* cuentan además con algún programa *software* que les permita analizar gráficamente qué está pasando en distintos puntos del entrenador, es posible acelerar aún más dicho aprendizaje.

En los tiempos actuales, no contamos con los recursos económicos necesarios para adquirir este tipo de productos y que además se adapten perfectamente a nuestras necesidades. Es por ello que en este trabajo se plantea el diseño e implementación de un entrenador de comunicaciones digitales de bajo coste y lo suficientemente completo para abordar el aprendizaje de muchos de los conceptos básicos sobre este tipo de sistemas de comunicación.

El diseño se ha decidido que esté basado en una FPGA, dadas las posibilidades de este tipo de productos para desarrollar sistemas de procesado digital eficientes y de bajo coste, además que se han demostrado muy adecuadas para este tipo de aplicaciones [2], [4]–[7]. Aunque se plantea este trabajo como un producto ya desarrollado para el aprendizaje de los esquemas de comunicación digital, es posible también enfocarlo como un proyecto de fin de carrera donde el objetivo sea el diseño del mismo propiamente dicho.

De esta forma, tras una breve descripción general del sistema en la sección II, la sección III detalla los diferentes elementos a tener en cuenta para llevar a cabo la implementación del entrenador. La sección IV presenta los resultados obtenidos tras el uso del mismo como parte del programa de prácticas de una asignatura sobre 'Comunicaciones Digitales' en relación al rendimiento académico del alumnado previo a su implantación. Por último, se finaliza con la exposición de las principales conclusiones de este trabajo en la sección V.

II. Descripción general del sistema

En la Fig. 1 se muestra el diagrama de bloques del entrenador a implementar. Como se puede observar, la mayor parte de las tareas a ejecutarse (generación de datos, modulación de los mismos, generación del ruido y demodulación de la señal recibida) recaen sobre la FPGA, que incluso controla la transferencia de información hacia el exterior mediante un conversor digital-analógico (DAC, *Digital-to-Analog Converter*) y un módulo UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*).

Adicionalmente, se requiere de un *software* instalado en el ordenador personal para poder analizar en tiempo real las distintas señales generadas en la FPGA, cuyos valores se reciben a través de su puerto serie.

III. Diseño del entrenador

Tal como se ha comentado previamente, en el desarrollo de este proyecto se optó por una realización digital del entrenador mediante el uso de lenguajes de descripción de *hardware* de alto nivel, en concreto VHDL (*Very high speed integrated circuit – Hardware Description Language*), para su posterior implementación en una FPGA comercial y prueba del mismo.

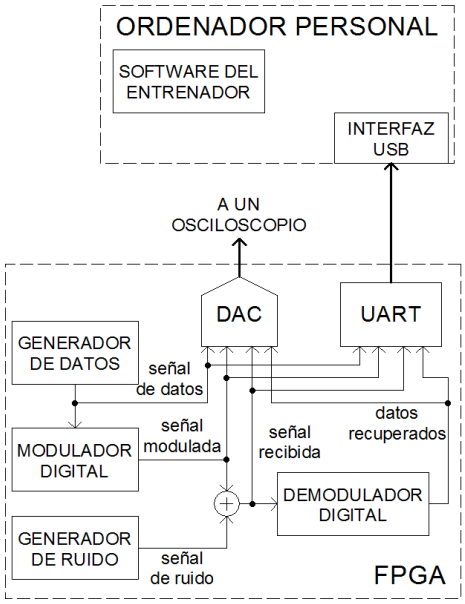


Fig. 1. Esquema de bloques del entrenador

En los siguientes apartados se describirán los aspectos básicos necesarios para poder llevar a cabo la implementación del entrenador en una FPGA. En particular, internamente se trabajará con palabras de datos por lo que es importante definir el formato a utilizar. Por otro lado, la forma de generar las señales portadoras requeridas por el modulador y el demodulador son igualmente de especial relevancia.

III-A. Formato de los datos

Se utilizó notación de punto fijo para definir el formato utilizado por los datos procesados por las diferentes estructuras del diseño realizado. En dicho formato de datos, de los N bits que constituye cada palabra de datos, se consideró notación en complemento a dos, de tal forma que el bit más significativo indica el signo, mientras que un número M de los bits menos significativos (LSB, *Least Significant Bit*) se utilizan para la parte decimal (véase la Fig. 2).

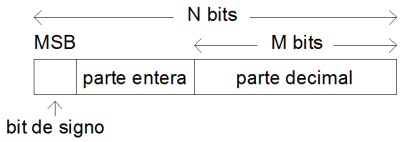


Fig. 2. Formato de la palabra de datos

Las FPGA comerciales suelen disponer de circuitos multiplicadores implementados internamente, por lo que los procesos de multiplicación pueden definirse fácilmente en VHDL y tienen una síntesis directa en la FPGA. Sin embargo, en este caso debe tenerse en cuenta que al multiplicar dos palabras tal como se definen en la Fig. 2, la palabra resultante será de $2N$ bits con una parte decimal de $2M$ bits (ver Fig. 3). Siempre que se trabaje con operandos que no produzcan *overflow* durante el proceso de multiplicación, esto es, que el resultado obtenido sea representable con N bits, es posible extraer, de la palabra resultante de $2N$ bits, aquéllos comprendidos entre la posición M y la posición $N + M - 1$ (considerando como LSB al bit 0) para configurar este resultado de N bits.

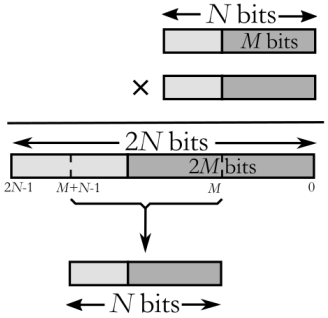


Fig. 3. Proceso de multiplicación de dos palabras de datos

III-B. Generación de las portadoras

La generación de las ondas portadoras (en el modulador y demodulador) se basa en una tabla de K posiciones que contiene las muestras de una forma de onda senoidal y dos punteros de dirección a la misma, uno de ellos desfasado $90°$ respecto del otro, o lo que es lo mismo, $K/4$ posiciones (véase la Fig. 4). Cada uno de los datos de la tabla utiliza el formato descrito en la Fig. 2.

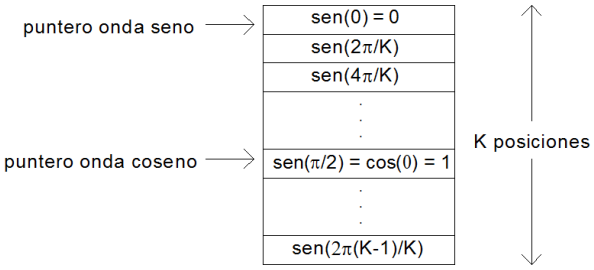


Fig. 4. Tabla de datos que describe las formas de onda senoidales

A cada flanco de la señal de reloj que controla el generador de portadora, los punteros incrementarán en una unidad su posición, describiendo la forma de la onda seno (y coseno). La portadora desfasada $90°$ (coseno) sólo será necesaria para modulaciones con componentes en cuadratura (QPSK, M-PSK o M-QAM) o por el demodulador. Para modulaciones FSK basta con aplicar desplazamientos a los punteros en cada ciclo de reloj diferentes a la unidad, obteniéndose ondas de frecuencias múltiplos de la de la señal de referencia definida por la tabla.

III-C. Generador de datos

El generador de datos se basa en el uso de registros de desplazamiento realimentados (FSR, *Feedback Shift Register*), que ofrecen secuencias pseudoaleatorias de máxima longitud ($P = 2^R - 1$ bits, donde R es el número de biestables) para

determinadas combinaciones de realimentación a través de una puerta XOR. En la Fig. 5 se muestra la estructura para el generador de $R = 5$ biestables implementado en nuestro caso, donde se requiere realimentar las salidas del segundo y último para obtener una secuencia de longitud máxima.

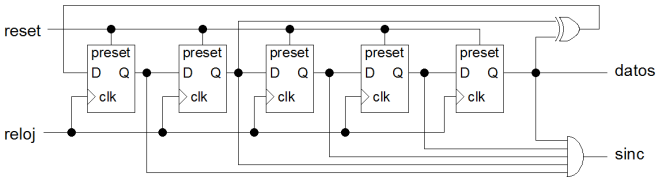


Fig. 5. Estructura del generador de datos

Los biestables deben inicializarse a nivel lógico '1', pues un valor '0' en todos ellos provoca que el FSR presente de manera indefinida un nivel lógico bajo a su salida. Cuando están adecuadamente realimentados, el contenido de los biestables del generador llega a conformar, de manera pseudoaleatoria y con igual probabilidad, todas las palabras binarias posibles con R bits salvo "00…0". Así, se han tomado los n LSB del generador de la Fig. 5 para disponer del dato a utilizar en cada caso por el modulador. Por ejemplo, para modulación 16-QAM se tomaban los $n = 4$ LSB, mientras que para QPSK sólo se requería de los $n = 2$ LSB.

III-D. Generador de ruido

Para obtener la señal de ruido AWGN se creó una tabla que contenía 256 valores que configuraban la función de distribución de probabilidad de un proceso aleatorio gaussiano. Luego, con un generador de datos como el de la Fig. 5 (en este caso, de 21 registros) se obtenía una palabra pseudoaleatoria de 8 bits. La palabra obtenida se iba comparando con los distintos valores de la tabla con la función de distribución gaussiana, hasta encontrar aquél más próximo. La posición en la tabla de dicho valor se hacía corresponder con la amplitud del ruido aleatorio para la muestra actual, a falta de aplicar algún factor de ganancia seleccionable por el usuario. De esta forma, se obtendrán más muestras de ruido con amplitudes próximas a cero, donde la función de distribución gaussiana experimenta mayores variaciones de su valor, dado que la búsqueda se realiza a través de un valor pseudoaleatorio con

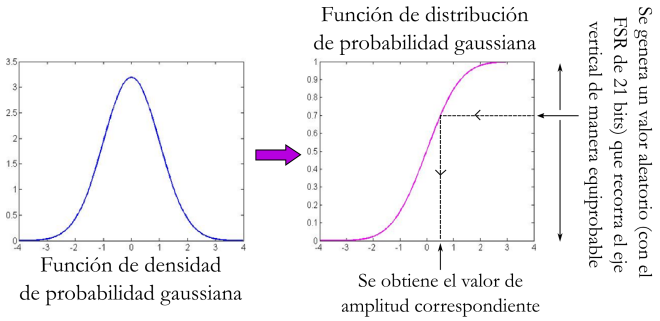


Fig. 6. Generación de las muestras de ruido

una distribución uniforme. La Fig. 6 esquematiza el proceso de obtención de las amplitudes para las muestras de ruido.

En la Fig. 7 se muestra cómo el generador de ruido implementado proporciona una distribución de la amplitud de las muestras de ruido con una función de densidad de probabilidad gaussiana, demostrando un correcto funcionamiento.

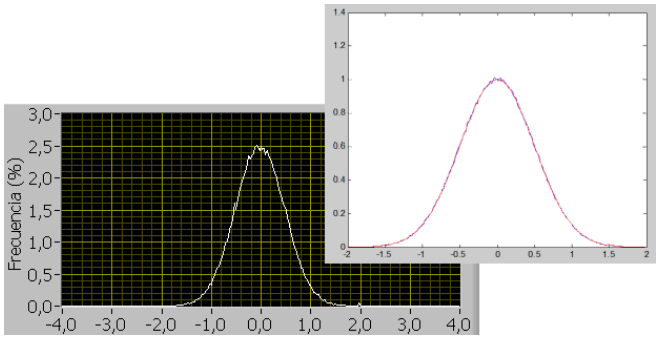


Fig. 7. Distribución de las muestras de ruido (amplitudes) durante una ejecución

III-E. Modulador digital

Para el diseño del modulador se optó por una estructura genérica donde dos portadoras en cuadratura son moduladas en amplitud por las componentes en fase x_i y en cuadratura y_i del símbolo i-ésimo a transmitir, obtenidos de la constelación correspondiente a partir de la palabra pseudoaleatoria de n bits suministrada por el generador de datos:

$$s_i(t) = x_i \sin \omega_c t + y_i \cos \omega_c t, \quad iT < t < (i+1)T \qquad (1)$$

donde $f_c = \omega_c / 2\pi$ es la frecuencia de la señal portadora definida por el número K de muestras de la tabla de la Fig. 4 y la frecuencia del reloj del puntero. T es el tiempo de símbolo. Para señales binarias, donde $n = 1$ (BPSK, FSK y ASK), los símbolos no tienen componente en cuadratura ($y_i = 0$).

III-F. Demodulador de datos

Para señales corrompidas por ruido AWGN, el detector óptimo consiste en *filtros de correlación* sincronizados a las portadoras en fase y en cuadratura [8]. A la salida de los correladores, el detector debe determinar el símbolo de la constelación que más se aproxime al símbolo demodulado.

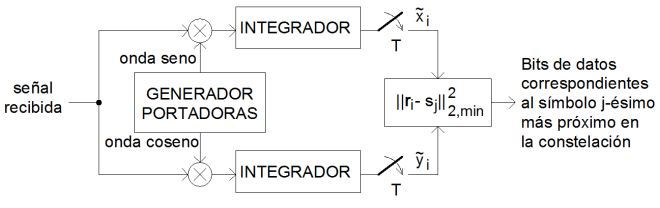


Fig. 8. Estructura del demodulador

En la Fig. 8 se muestra la estructura del demodulador implementado. Se ha supuesto que se dispone de una sincronización

perfecta entre el generador de portadoras del demodulador y la señal recibida, aunque el entrenador permite la introducción de retardos para observar el efecto que producen sobre la demodulación de los datos. Para constelaciones complejas como 16-QAM, el símbolo recibido $\mathbf{r}_i = \tilde{x}_i + j\tilde{y}_i$ debe compararse con cada uno de los $L = 2^n$ símbolos de la constelación $\mathcal{M}^L$ y determinar aquél que minimice la distancia euclídea entre ambos:

$$\check{\mathbf{s}}_j = \underset{\mathbf{s}_j \in \mathcal{M}^L}{\arg\min} \|\mathbf{r}_i - \mathbf{s}_j\|_2^2 = \underset{\mathbf{s}_j \in \mathcal{M}^L}{\arg\min} \left[(\tilde{x}_i - x_j)^2 + (\tilde{y}_i - y_j)^2\right] \tag{2}$$

donde $\check{\mathbf{s}}_j = \check{x}_j + j\check{y}_j$ es el símbolo más probable de haber sido transmitido y $\| \ \|_2^2$ denota la norma euclídea al cuadrado. Para constelaciones más simples como QPSK o modulaciones binarias es posible sustituir el bloque de búsqueda del símbolo más próximo por comparadores donde el umbral se establece al punto medio entre los posibles símbolos recibidos.

IV. Resultados

La Fig. 9 muestra una instantánea del entrenador implementado, donde las señales suministradas por la tarjeta que contiene la FPGA son representadas en un osciloscopio, así como en el *software* residente en el ordenador que se ha desarrollado utilizando LabVIEW®. La FPGA por la que se ha optado finalmente es una Spartan 3A [9], de la que apenas se ha requerido un 25 % de sus recursos lógicos para la implementación del entrenador.

Como se ha comentado, el entrenador permite la visualización de las principales señales generadas en el mismo a través de la observación de los cuatro canales de salida de su conversor D/A. La Fig. 10 muestra la adquisición con un osciloscopio de dichas señales para el caso de modulación FSK (señal transmitida, datos transmitidos, señal recibida con ruido y datos demodulados). Podemos observar un perfecto funcionamiento del demodulador, donde los datos demodulados coinciden con los transmitidos con un retardo de un bit, correspondiente al tiempo de símbolo T (el requerido por los integradores de la Fig. 8 para obtener la estimación de los símbolos recibidos).

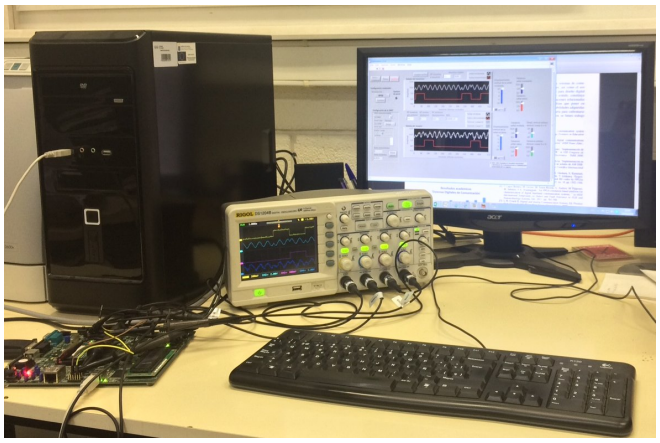


Fig. 9. Visual del entrenador

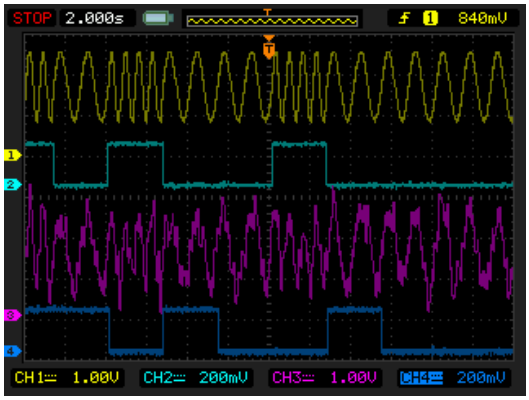


Fig. 10. Visualización de las señales del entrenador en un osciloscopio

En relación al *software* desarrollado para analizar las señales suministradas por el entrenador de comunicaciones digitales, la Fig. 11 muestra dos instantáneas de los paneles principal y secundario que componen la interfaz de usuario.

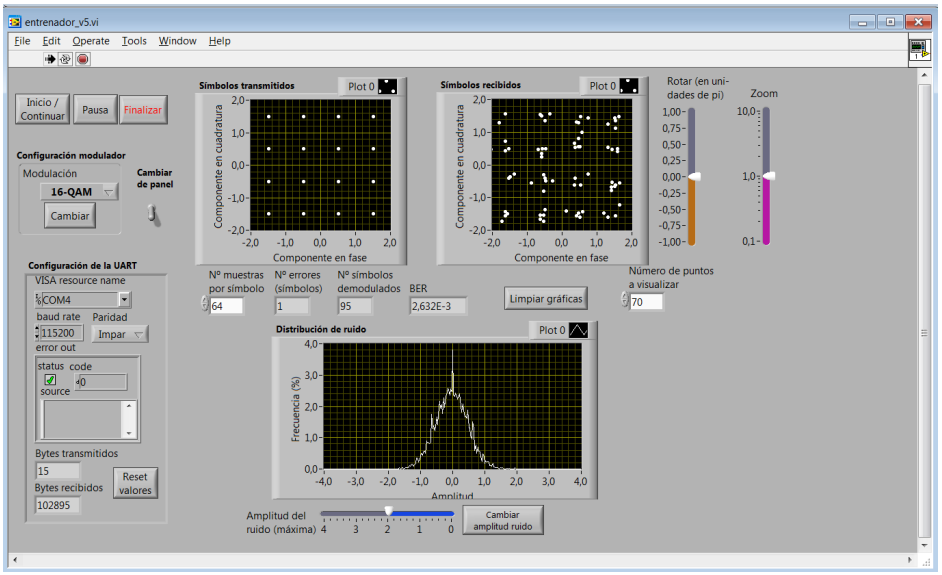
El panel principal muestra la evolución temporal de las señales tanto en el modulador como en el demodulador, en este caso para modulación QPSK, donde además se proporciona información sobre el número de errores cometidos durante la demodulación de los datos si los hubiese habido. Obsérvese que los datos demodulados (señal en rojo en la gráfica inferior del panel) están retrasados un tiempo de símbolo T respecto de los datos originalmente transmitidos (señal en rojo en la gráfica superior), por lo que se comprueba que en esta captura no se han producido errores de transmisión.

El segundo panel puede utilizarse para analizar las constelaciones de las señales transmitidas y recibidas, así como la distribución de las muestras de ruido. La figura presenta una ejecución para 16-QAM. Observando la constelación de los símbolos recibidos, los obtenidos por combinación de las señales $\tilde{x}_i$ e $\tilde{y}_i$ a la salida de los filtros correladores (ver Fig. 8), se hace evidente la dispersión provocada por el ruido en el receptor. El panel muestra además que se ha producido un error en la demodulación de un símbolo, presumiblemente entre los símbolos correspondientes a la tercera columna de la segunda fila de la constelación de símbolos recibidos, de un total de 95 símbolos demodulados hasta ese momento. Teniendo en cuenta que se ha utilizado codificación Gray para la definición de las constelaciones (entre símbolos adyacentes únicamente hay una diferencia en un solo bit entre los símbolos binarios que representan), eso implica que sólo habrá un único bit erróneo del total de 95 símbolos $\times\ 4$ bits/símbolo $= 380$ bits transmitidos. Lo anterior lleva a una tasa de error de bit (BER, *Bit Error Rate*) de $1/380 = 2{,}632 \cdot 10^{-3}$, tal como indica el propio panel.

La Fig. 12 muestra los resultados académicos obtenidos por el alumnado en la temática de 'Sistemas de Comunicación Digital', antes y después de la introducción del entrenador de comunicaciones digitales como parte del programa de



(a) Panel principal durante el análisis de la modulación QPSK



(b) Panel secundario durante el análisis de la modulación 16-QAM

Fig. 11. Paneles para el análisis de las señales del entrenador

prácticas de una asignatura de máster. Durante los cursos 2013-2014 y 2014-2015 se produce un período de transición entre el máster precedente y el que lo sustituye, donde además la asignatura se traslada del primer año al segundo del máster, por lo que no se imparte, de ahí que no existan resultados para dichos cursos. Hay que indicar que el número de estudiantes de esta asignatura es reducido, con una media de cinco estudiantes anuales. Los resultados académicos mostrados se refieren al rendimiento del alumnado ante una prueba escrita donde se solicitan respuestas cortas que buscan evaluar el aprendizaje de los principales conceptos relativos a los distintos aspectos sobre sistemas de comunicación digital cubiertos por la asignatura.

En el período previo a la introducción del entrenador, se observa que durante el último curso del mismo (2012-2013) los resultados académicos experimentan una notable mejora a pesar de no contarse con esta nueva herramienta en las sesiones prácticas. La nota media sube hasta 6,2 cuando en el pasado se encontraba generalmente por debajo del 5. Sin embargo, hay que indicar que durante ese curso, con un pico de matriculados que superaba los diez estudiantes, se contó con un grupo del alumnado especialmente competente, lo que lleva a una importante alteración de la realidad general. De hecho, durante ese curso, si bien es cierto que cerca del 30 % de los estudiantes superaron la calificación de 8 sobre 10 en los temas sobre ‘comunicaciones digitales’ de la asignatura, el 60 % de

la clase obtuvo una calificación inferior a 6, donde la mitad de este segundo grupo no consiguió siquiera alcanzar el aprobado en esa temática de la asignatura. La desviación estándar de las calificaciones para este curso 2012-2013 (ver Fig. 12) delata esta situación, donde se observó una gran disparidad en el rendimiento de los distintos estudiantes.

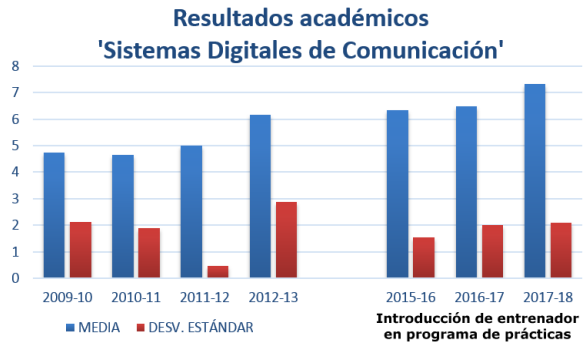


Fig. 12. Resultados académicos antes y después de incluir el entrenador como parte de las actividades prácticas

Los pobres resultados del alumnado en los temas de 'comunicaciones digitales' observados durante los sucesivos cursos académicos, llevan durante el año 2014 a plantearse algún tipo de solución. Es por ello que se lleva a cabo el desarrollo del entrenador de comunicaciones digitales y su implantación en el programa de prácticas de la asignatura equivalente del nuevo máster. El efecto es inmediato manifestándose en dos aspectos del rendimiento académico. Por un lado, la nota media experimenta un incremento superior al 31 %, pasando de 5,1 a 6,7. Si no tenemos en cuenta los cursos 2012-2013 y 2017-2018, donde son apreciables notas medias superiores a los promedios en ambos períodos (antes y después del uso del entrenador en las prácticas), estaríamos hablando de un incremento de un 34 % desde una nota media de 4,8 a otra de 6,4 en el nuevo período. Por tanto, es patente la mejora en los resultados promedios del alumnado. Además, el segundo aspecto a resaltar en la asignatura del nuevo máster es que todo el alumnado ha superado hasta la fecha los exámenes relativos a estos tópicos sobre 'comunicaciones digitales', aún cuando se enfrentaban a exámenes equivalentes a los realizados por el alumnado del anterior máster, alumnado este último donde el 40 % no fue capaz de superar ese módulo de la asignatura.

V. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado el diseño e implementación en FPGA de un entrenador para el aprendizaje de comunicaciones digitales, donde se ha hecho uso de la herramienta de programación LabVIEW para el desarrollo del *software* residente en el ordenador. Igualmente, se muestran las posibilidades ofrecidas por el prototipo en cuanto a las diferentes características de los sistemas de comunicación digital que pueden ser analizadas con el mismo. A la vista de los resultados presentados, se puede considerar que el entrenador desarrollado constituye una herramienta bastante versátil para promover una mejor comprensión de este tipo de sistemas de comunicación, además de ser fácilmente adaptable para incorporar nuevas funcionalidades. Finalmente, se ha evaluado la potencialidad del entrenador para mejorar los resultados de aprendizaje sobre comunicaciones digitales en asignaturas de máster que abarquen esta materia, donde se aprecia una notable mejora en el rendimiento académico del alumnado, con incrementos superiores al 30 % en las calificaciones medias, tras la implantación de su uso dentro del programa de prácticas de dichas asignaturas.

Por otro lado, comprendiendo el diseño y la implementación del entrenador como un posible trabajo de fin de titulación, su consecución conlleva el estudio de los sistemas de comunicación, procesamiento digital de señales, así como el uso de lenguajes de descripción de *hardware* para diseño digital y la programación en LabVIEW. En ese sentido, constituye un reto interesante para estudiantes de titulaciones relacionadas con la ingeniería electrónica, que tendrían que poner en práctica muchos de los conocimientos y habilidades adquiridas durante su formación, lo que les capacitaría para enfrentarse a problemas similares o más complejos en su futuro trabajo como ingenieros/as.

Referencias

[1] J.M. Santiago, Jr., A.S. Ali, "Educational communication system (EDUCOMM)-a training device," in *Proceedings Frontiers in Education Conference*, Oct. 1988, pp. 142-148.

[2] F. Ahamed, F.A. Scarpino, "An educational digital communications project using FPGAs to implement a BPSK detector," *IEEE Trans. Educ.*, vol. 48, no. 1, pp. 191-197, Feb. 2005.

[3] R. Serrano, J.M. Górriz, J. Ramírez, C.G. Puntonet, "Implementación de entrenadores de comunicaciones en placas PCB," in *VIII Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica - TAEE 2008*, Julio 2008, p. 112.

[4] O. González, A. Ayala, S. Rodríguez, B.R. Mendoza, "Implementación en FPGA de un bucle Costas para la demodulación de señales de AM DSB-SC," in *XXIV Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio - URSI 2009*, Septiembre 2009, p. 57.

[5] T. Mizuochi, Y. Konishi, Y. Miyata, T. Inoue, K. Onohara, S. Kametani, T. Sugihara, K. Kubo, H. Yoshida, T. Kobayashi, T. Ichikawa, "Experimental demonstration of concatenated LDPC and RS codes by FPGAs emulation," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 21, no. 18, pp. 1302-1304, Sept. 2009.

[6] J. Lagos-Benites, M. Grosso, M. Sonza Reorda, G. Audisio, M. Pipponzi, M. Sabatini, V.A. Avantaggiati, "An FPGA-emulation-based platform for characterization of digital baseband communication systems, " in *IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI and Nanotechnology Systems*, Oct. 2011, pp. 391-398.

[7] O. Font-Bach, N. Bartzoudis, A. Pascual-Iserte, D. López Bueno, "A real-time FPGA-based implementation of a high-performance MIMO-OFDM transceiver featuring a closed-loop communication scheme," in *IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, Oct. 2012, pp. 100-107.

[8] L.W. Couch II, *Digital and Analog Communication Systems,* Ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, United States, 2007.

[9] *Spartan-3A FPGA Family: Data Sheet*, Xilinx, Inc., 2010.

Diseño de plataforma de robots evolutivos, para la posterior impartición de talleres a jóvenes de altas capacidades

Alberto Díaz, Nicolás Rodríguez, Iván Torres. *Museo de la Ciencia y el Cosmos*

Antonio Mampaso, *Investigador del Instituto de Astrofísica de Canarias. Director del Museo de la Ciencia y el Cosmos*

San Cristóbal de la Laguna, España

alu0100954128@ull.edu.es, alu0100950519@ull.edu.es

alu0100950625@ull.edu.es, amr@iac.es

Abstract— La realización de talleres avanzados de robótica orientados a estudiantes con altas capacidades supone un reto para estimularlos y despertar su interés hacia la ingeniería y las ciencias en general. En esta comunicación se describe el diseño de un taller de robótica evolutiva que se impartirá en el Museo de la Ciencia y el Cosmos durante el presente curso escolar. Se ha construido un prototipo de mini-robot adaptado para la docencia a partir de los resultados del primer estudio sobre emergencia de la comunicación entre robots publicado por Floreano et al. (2007). La finalidad última del taller es experimentar con el concepto de evolución en sistemas complejos (vivos o no) y con la teoría darwiniana que explica dicha evolución. En paralelo, se trabajarán otros aspectos, como la resolución de problemas y el uso de las matemáticas como herramienta básica para la ingeniería y la ciencia.

Index terms—Robótica, evolución, altas capacidades, TIC, docencia enseñanzas secundarias, talleres prácticos

I. Introducción

Uno de los resultados más sorprendentes de la robótica en los últimos años es la emergencia espontánea de la comunicación en colonias de robots que evolucionan en entornos que simulan al de los seres vivos. Cada robot se programa con un algoritmo genético que determina su comportamiento en un entorno dado, y, al igual que en los seres vivos, es la interacción entre el azar, los genes (el programa inicial) y el entorno (dónde hay "comida" y dónde hay "veneno") la que determina quién sobrevive y quién no. Las experiencias llevadas a cabo en el Laboratorio de Sistemas Inteligentes (LSI) de la Universidad de Laussane (Suiza) y publicadas en Floreano et al. (2007) muestran que, tras 30 ó 40 generaciones, surge espontáneamente la comunicación en cada colonia de robots, y surge por la misma razón que en los seres vivos: los individuos evolucionan por adaptación y aquellos que "descubren" la comunicación tienen ventaja evolutiva y más posibilidades de sobrevivir. La conclusión puede parecer sorprendente, pero es real y de la máxima importancia para entender la evolución de los sistemas complejos: la selección natural, la base de la teoría de Darwin, gobierna tanto a los seres vivos como a los robots.

El Museo de la Ciencia y el Cosmos está llevando desde 2015 el proyecto de robótica evolutiva "CosmoBots" para desarrollar prototipos de mini-robot basados en el estudio del LSI pero mejorados tanto en hardware como en software. La finalidad es mostrar a los visitantes cómo surge la comunicación, construyendo una colonia de unos 50-100 robots que evolucionarán a la vista del público. El taller que describimos aquí está basado en esa experiencia, y se impartirá a jóvenes cursando la ESO y calificados como de altas capacidades por la Consejería de Educación del Gobierno de Canarias. El proyecto está financiado por la Fundación CajaCanarias, La Caixa y el propio Museo de la Ciencia y el Cosmos.

La meta de los talleres no es sólo tecnológica, sino también biológica: se trata de que los jóvenes entiendan la evolución y experimenten con ella. El programa previsto para los talleres es el siguiente:

-Construcción de un mini-robot y programación con algoritmos genéticos. El objetivo es entender cómo se ensamblan y programan los robots y por qué.

-Investigación sobre la evolución de los seres vivos. La meta es reflexionar sobre la evolución como un hecho comprobado y que la mejor teoría existente para explicarla es la de Darwin: selección natural y adaptación al entorno.

-Análisis de la comunicación y el lenguaje en los seres vivos y en los robots. Aparición espontánea de la comunicación en colonias de robots.

-Investigación sobre la posible emergencia en la colonia de otras características relacionadas con el lenguaje (engaño en la comunicación) y con la conducta (altruismo y depredación). Estos son temas avanzados que están siendo investigados en la actualidad en las universidades. Serán presentadas a los participantes a nivel conceptual.

Cada taller se impartirá en una sesión semanal de 90 minutos durante cuatro meses y está dirigido a jóvenes con altas capacidades y motivación hacia la ciencia y la robótica.

II. Desarrollo del prototipo de mini-robot evolutivo.

Funcionamiento general

Los robots que se describen a continuación son una simplificación de los descritos por el equipo del Dr. Dario Floreano et al. en el artículo *Evolutionary Conditions for the Emergence of Communication in Robots.* [1]

Dichos robots son sistemas inteligentes dotados con una red neuronal monocapa, con 3 perceptrones (10 entradas y 3 salidas), además de un código genético aleatorio que definirá los pesos sinápticos dentro de la red neuronal. El vector de entradas del sistema emplea exclusivamente 2 tipos de sensores distintos: un sensor de color TCS3200[2] orientado hacia el suelo y 4 sensores de color desarrollados por el equipo de este informe, que cubren los 4 cuadrantes de visión del robot y son capaces de detectar la cantidad de luz azul y roja en el ambiente.

En lo referido al sensor TCS3200, su papel reside en detectar los colores del suelo. Los colores no serán directamente entradas de la red neuronal, sino que previamente se compara el color leído con dos colores predefinidos. Si no coincide con ninguno de ellos, las neuronas de entradas 0 y 1 tomarán el valor 0, mientras que, si coincide con uno de los colores, la neurona correspondiente valdrá 1 y la otra 0.

En cuanto al sensor de luz ambiente, se cubren 4 cuadrantes de visión y se distingue la cantidad de azul y rojo en la luz ambiente. Esa información se pasa a una escala 0-1 y sirve de entradas a la red neuronal. Cada cuadrante, por tanto, tiene 2 neuronas distintas asignadas lo que suma un total de 8 neuronas asignadas a la luz ambiente.

Por otro lado, las 3 neuronas de salida se relacionan directamente con un actuador. Las dos primeras neuronas se corresponden con dos motores DC, con un rango de -1 a 1 y la última neurona se relaciona con 8 LED's RGB dispuestos a lo largo del perímetro del robot, siendo procesada su salida para elegir el color a mostrar.

Diseño mecánico

En lo que se refiere al diseño mecánico del robot, la problemática principal es dar cabida a toda la electrónica del robot en un espacio reducido, pues el experimento original consta de una gran cantidad de robots y el hecho de que estos sean de grandes dimensiones conllevaría la necesidad de un espacio demasiado grande. Teniendo esto en cuenta el diseño se ha realizado aprovechando la altura, donde no tenemos limitaciones de espacio.

El robot cuenta con 2 piezas principales: la base y la planta superior. En la base situamos las ruedas y sus 2 motores junto a una rueda giratoria que sirve de apoyo, todo esto está integrando en la parte inferior para ahorrar espacio. Además, se ha buscado que el robot sea lo más bajo posible, con el fin de que el sensor de color orientado hacia el suelo se encuentre protegido sin necesidad de añadir otro elemento de protección en el diseño. (Figura 1)

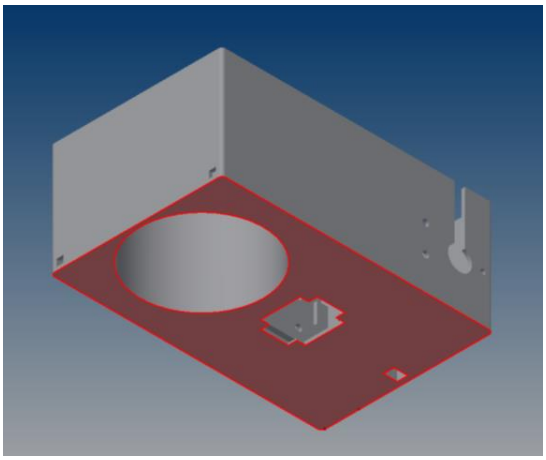


Fig. 1: Base robot

Esta planta del robot incluirá también las 2 baterías y una protoboard, con parte del circuito electrónico del robot.

La siguiente planta del robot es donde se sitúan todos los elementos necesarios para la comunicación entre robots, en cada cara del robot nos encontramos con 4 leds RGB y un sensor, capaz de detectar la cantidad de color rojo o azul, que será explicado más adelante. Además, en este nivel tenemos otra protoboard con la parte restante de la electrónica (Figura 2). En el diseño se aprecia cómo la zona donde se insertan los leds tiene un pequeño borde. Su finalidad es evitar que la luz de un robot pueda influir sobre sí mismo, aunque también se tomaron otras precauciones en el diseño en sí del soporte del sensor.

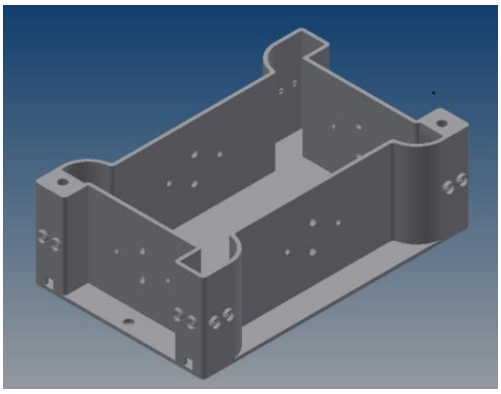


Fig. 2: Nivel superior robot

Para proteger el sensor de color ambiente se ha diseñado una pieza que se atornilla al robot, con la finalidad de que se pueda sustituir con facilidad en caso de que, por ejemplo, se dañe el filtro. (Figura 3)

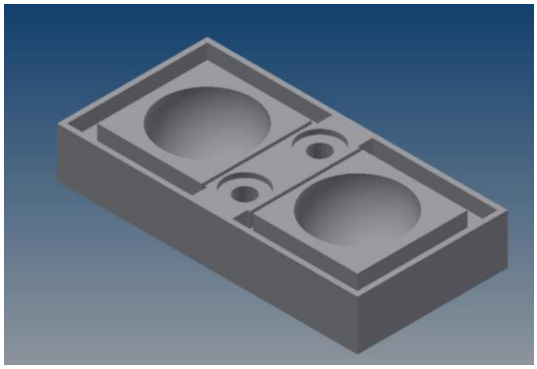


Fig. 3: Soporte sensor color ambiente

De cara a evitar el efecto antes mencionado de que la luz de un robot afecte al mismo robot, se ha hecho una zona cóncava donde se colocará el fototransistor. Además, todo el robot se ha impreso en color negro para evitar el reflejo de la luz, minimizando el efecto de los reflejos en la lectura del sensor. Por otro lado, se pueden apreciar unos carriles en torno al perímetro rectangular del soporte, cuya finalidad es que se ponga el adhesivo correspondiente para fijar el filtro.

Software

El código empleado en el robot se ha estructurado en 3 niveles jerárquicos: main, procesos y subprocesos. La finalidad de esta organización es la de clarificar la lectura del código y simplificar la detección de errores dentro del mismo, empleando una técnica modular.

El nivel main es el encargado de gestionar la navegación general durante la ejecución. Desde este archivo se llaman a los 3 procesos generales: lectura de sensores, cálculo de los valores de la red neuronal y salidas de los actuadores.

En la lectura de los sensores se emplean los subprocesos *tcs* y *phototransistors*, que leen todas las entradas sensoriales y las convierten a los valores de entrada a la red neuronal. Durante el cálculo se toman los valores de entradas y los pesos sinápticos definidos en el código genético y se calculan las salidas sumando todas las entradas pesadas y empleando una función tangente hiperbólica como función de activación, lo que da un rango efectivo de -1 a 1 en las salidas.

El proceso de salida se encarga de traducir la información de salida para hacer la comunicación efectiva con los actuadores.

Mediante esta técnica de deslocalización de los procesos, de mayor a menor jerarquía y generalidad, se ha conseguido emplear únicamente 2 variables globales, que suponen un 2% de la memoria dinámica del Arduino Nano empleado, lo que resalta las ventajas de la técnica usada, con la cual se puede optimizar el uso de los recursos disponibles. Además, todos los procesos se han desarrollado manualmente, evitando el uso de librerías externas, con la finalidad de acelerar el tiempo de ejecución y minimizar el tiempo de cada ciclo de ejecución.

La reducción del tiempo de ejecución abre la posibilidad de que en el futuro se puedan añadir funcionalidades como comunicación wifi y uso de una tarjeta SD auxiliar, pensando en el uso de los robots diseñados como parte de una réplica del experimento llevado a cabo por el Dr. Dario Floreano y su equipo. [1]

Electrónica

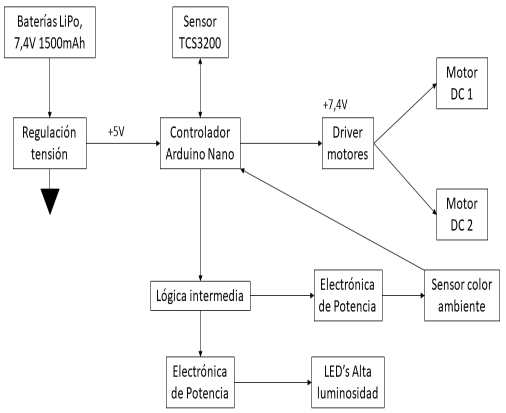


Fig. 4: Esquema de bloques del circuito electrónico

Como se puede observar en la figura 4, el elemento principal del robot es el controlador Arduino Nano con un procesador ATMega328. Este microcontrolador será el encargado de todo el bloque de control, pero debido a las limitaciones en el número de pines disponibles se ha empleado elementos lógicos intermedios para efectuar el control del bloque de sensores de color ambiente y del control de los LED's de salida.

La lógica intermedia está formada por un integrado dual decoder 2 a 4 con lógica negada, SN74HCT139N [3] conectado a dos integrados SN7400N quad NAND de 2 entradas. [4]

En cuanto al driver de los motores, se ha empleado un integrado L293NE [5] alimentado a 7.4 V, que servirá para controlar los dos motores DC que tiene el robot. Además, cabe destacar que la alimentación de los motores no está regulada, ya que se conectan directamente a las baterías.

Los elementos empleados como interruptores de potencia son 6 BJT 2N2222[6], que funcionan como interruptores controlados por el microcontrolador Arduino, lo que implica que funcionan en las regiones de corte y saturación.

Por último, para la regulación de tensión se ha empleado un regulador conmutado R-785.0-1.0[7] que no necesita disipador aun teniendo en cuenta que soporta una corriente demandada de 1 A. La eficiencia de este convertidor DC-DC para el voltaje de entrada en nuestro robot, 7.4V, se encuentra en torno al 95%, lo que le da una ventaja enorme desde el punto de vista

energética, sobre todo si lo comparamos con un regulador lineal L7805.

Sensor de color ambiente

En cuanto a la detección de los colores azul y rojo en cada uno de los cuadrantes, inicialmente el objetivo fue replicar el experimento del Dr. Dario Floreano, en el que se utilizaba, para cada robot, una cámara omnidireccional que recogiese la información de los cuatro sectores.

En el caso del presente proyecto, para simplificar el software y con ello conseguir un tratamiento de la información más rápido, se prescindió de este tipo de cámaras, y se buscó una solución más adecuada que implementar en el Arduino Nano. Hasta el momento la mejor opción encontrada ha sido la de fabricar un sensor basado en un filtro Bayer, cuyo montaje se explica a continuación, y que consigue recoger, por separado, la información de la cantidad de luz roja, azul y verde que le llega. En el caso de este proyecto solo era necesario conocer la presencia de los dos primeros colores mencionados.

Para ello, lo primero fue diseñar la pieza a utilizar para su posterior impresión en 3D. Se empleó el software de Autodesk, *Inventor Professional*. En ella se dispusieron dos semiesferas. En cada una de ellas se colocó un fototransistor de luz visible TEPT4400 [8], cuyo propósito era el de amplificar la corriente que pasaba por su emisor según la cantidad de luz que le llegaba. Esto ocurre ya que la base de este componente se polariza mediante la luz que le llega.

El circuito consiste en la unión del colector a un punto de potencial 5 voltios respecto a tierra y del emisor a una resistencia de 100.000 ohmios que se une a tierra. Con esto se consigue que cuanta más luz llegue a la base del fototransistor, más corriente salga de su emisor y por tanto se produzca una caída de tensión mayor en la mencionada resistencia. Esta diferencia de tensión es la información que recoge el Arduino con la que, tras un tratamiento de estos datos, se envía a la red neuronal. Hay que recordar que se utilizan dos de estos fototransistores para poder percibir color azul y rojo.

En la pieza impresa en 3D se dejaron unas hendiduras en las que se coloca la silicona usada para adherir el filtro de luz correspondiente.

Tras diversas pruebas con papel celofán comercial de los dos colores, rojo y azul, se decidió usar filtros fotográficos, que poseen mejores propiedades que el papel celofán. La información recogida en función de la distancia entra la luz y el fototransistor, usando papel celofán, se recogió en tablas.

En la Tabla 1 se muestran los datos recogidos por dos fototransistores, con filtro azul y con filtro rojo respectivamente. El foco de luz utilizado para esta prueba consta de dos LED's RGB de alta luminosidad. El montaje descrito se incluye cuatro veces en cada robot, colocando cada filtro en cada uno de los cuatro lados, para poder obtener el valor de las cuatro neuronas para la luz azul de cada sector y las cuatro neuronas de la luz roja.

Los valores que se introducen en las neuronas de la red neuronal deben tener un valor entre 0 y 1. Para convertir la lectura dada por el Arduino en un valor de dicho rango, se tomó como valor más alto el que se conseguía para una distancia de cinco centímetros, que se tomaba como 1. No se tomó como valor más alto el de los 0 cm dado que los robots, durante el experimento evolutivo, rara vez se encontrarán a distancias tan cercanas.

En el código se limitarán los valores posibles entre 0 y 1, si ocurriese que se acerca a menos de cinco centímetros seguiría tomando un valor de 1. En el caso de los resultados que dan negativo, el resultado se pondrá a 0 por la misma limitación. Por otro lado, y para asignarle un 0, se tomó la lectura cuando se tapaba el filtro, lo que implica que la luz no conseguía pasar. Como se aprecia en los resultados obtenidos, es en los primeros centímetros cuando la variación de la intensidad lumínica es más notable, con lo que a partir de unos centímetros el resultado sería prácticamente 0.

Tabla 1: 4 Capas el filtro azul y 8 capas el filtro rojo

LED AZUL						LED ROJO					
FILTRO AZUL			FILTRO ROJO			FILTRO AZUL			FILTRO ROJO		
Distancia (cm)	Lectura	Valor (0-1)	Distancia (cm)	Lectura	Valor (0-1)	Distancia (cm)	Lectura	Valor (0-1)	Distancia (cm)	Lectura	Valor (0-1)
0	787	1,00	0	135	0,11	0	247	-0,04	0	1005	1,00
5	468	1,00	5	147	0,12	5	269	0,06	5	994	1,00
10	380	0,58	10	95	0,07	10	251	-0,02	10	757	0,75
15	320	0,30	15	61	0,03	15	251	-0,02	15	480	0,47
20	298	0,20	20	53	0,02	20	248	-0,04	20	334	0,31
25	287	0,15	25	44	0,01	25	250	-0,03	25	241	0,22
30	276	0,09	30	38	0,01	30	246	-0,05	30	190	0,17

35	274	0,08	35	39	0,01	35	252	-0,02	35	156	0,13
40	264	0,04	40	43	0,01	40	248	-0,04	40	126	0,10
45	263	0,03	45	36	0,01	45	251	-0,02	45	95	0,07
50	266	0,05	50	30	0,00	50	250	-0,03	50	80	0,05
55	265	0,04	55	34	0,00	55	249	-0,03	55	75	0,05
60	262	0,03	60	36	0,01	60	254	-0,01	60	66	0,04
Tapando	256	0,00	Tapando	31	0,00	Tapando	256	0,00	Tapando	31	0,00

Tabla 1: muestra la variación de los valores de lectura del sensor de color con el aumento de la distancia respecto del foco lumínico.

Lo que se hizo fue unir los puntos tomados como extremos mediante una recta. De esa forma se obtienen los valores de la Tabla 1, que en el caso del filtro azul es:

$$(1)\ Valor = (\frac{Lectura}{212})\ \text{-1.20755}$$

y en el caso del filtro rojo es:

$$(2)\ Valor = (Lectura \times 0{,}001038)\ \text{-0.0322}$$

III. Análisis de resultados

Gráficas motor

El robot requiere de dos motores de CC para desplazarse. Con el objetivo de analizar su comportamiento, se han distinguido dos casos: un motor funcionando a la vez, y ambos motores funcionando al mismo tiempo. Para realizar este análisis vamos a medir la intensidad consumida por los motores para un rango de velocidades de 0 a 0.95, estando entre los valores que pueden tomar las neuronas. Los valores que puede tomar una salida PWM en Arduino van desde 0 hasta 255 pues se usan 8 bits para la codificación. Lo que se ha hecho es multiplicar por 255 el valor de la neurona de salida para escalar los valores.

En primer lugar, vemos la respuesta de intensidad para 1 y 2 motores en función de la velocidad (Figura 5).

Una de las observaciones claves que hacemos al realizar estas pruebas es que desde la velocidad de 0 hasta 0,2 el motor no se mueve, aunque consume intensidad. Tal y como apreciamos en la gráfica consume una cantidad considerable con un solo motor, pero es aún más notable cuando montamos dos. Viendo esto es de esperar que cuando montemos el motor con reductora y tenga que mover la masa del robot, la velocidad para que se empiece a mover sea aún mayor. Esto se ajustará en el código para evitar los posibles daños derivados.

El hecho de que el motor no se mueva no es solo importante porque se pueda dañar el motor, sino también por el lado del consumo pues se puede apreciar que una vez el motor está en movimiento el consumo es menor.

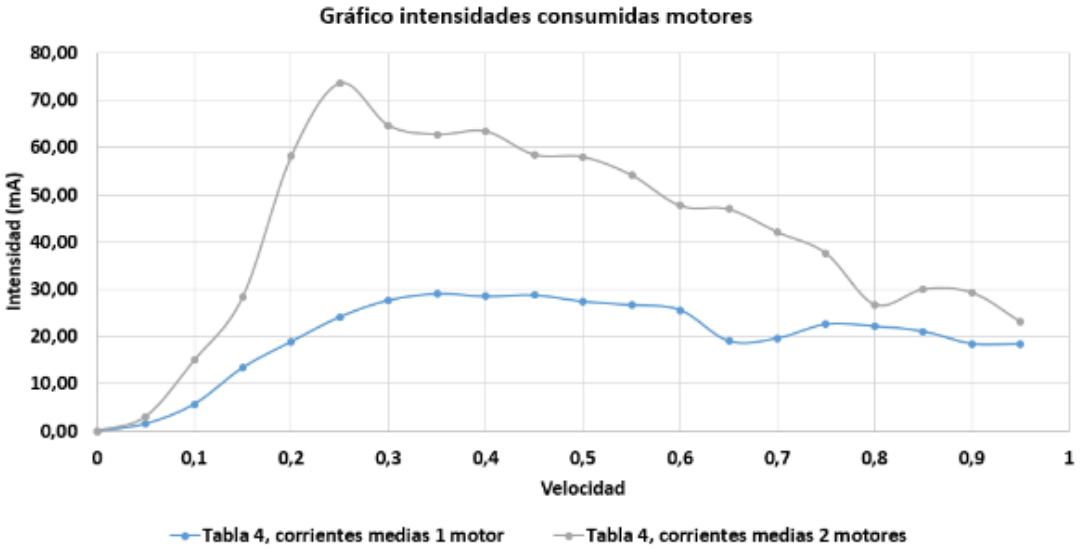


Fig. 5: Variación de la intensidad consumida en el caso de 1 motor (azul) y en el caso de 2 motores (gris) frente a la velocidad relativa de los motores

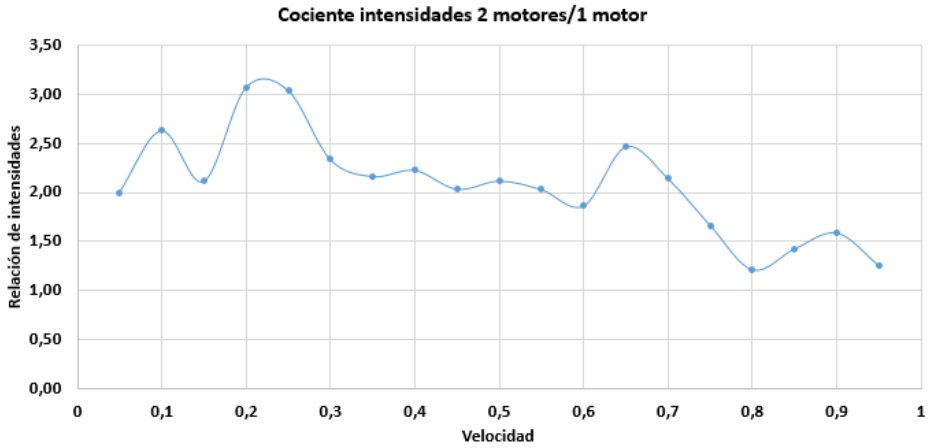


Fig. 6: Relación de consumos (Intensidad consumida por 2 motores/ Intensidad consumida por 1 motor) frente a la velocidad relativa de los motores

En paralelo se ha efectuado una gráfica para ver la relación entre la intensidad consumida por 2 motores frente a la consumida por uno (Fig. 6).

En velocidades pequeñas la intensidad de los dos motores es el doble o más de lo que consume un solo motor, mientras que en el rango central de velocidades se estabiliza en torno al doble de la intensidad consumida. En el rango superior de velocidades se produce una convergencia de los consumos, aunque el caso de dos motores sigue consumiendo por encima del caso de un motor.

Dicho comportamiento de convergencia puede deberse a la ineficiencia del integrado L293NE, en el que se produce una caída aproximada de 2.5V. Para minimizar este efecto, se cambió el voltaje de alimentación del integrado, que inicialmente se había establecido en 5 V y que en el diseño final se ha elevado a 7.4V, es decir, al voltaje de alimentación.

Gráficas sensor de color ambiente

Para estudiar el sensor de color ambiente se procedió a montar un sensor e ir alejándolo de 5 en 5 centímetros y registrando con el Arduino la lectura que nos devuelve con *analogRead()*, midiendo la caída de tensión de la resistencia conectada en serie con el emisor, siguiendo el esquema comentado en el apartado específico de este sensor dentro del artículo.

En primer lugar, ponemos el led de color azul, esperando que la lectura decrezca para el filtro azul y que en el caso del filtro rojo se mantenga en un valor bajo, pues no hay componente de color rojo. Los datos obtenidos los vemos en la Tabla 1.

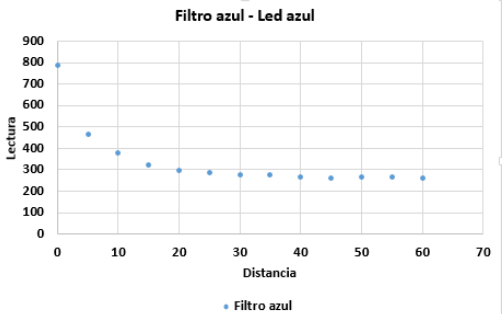


Fig. 7: Variación bruta lectura filtro azul con luz azul respecto de la distancia al foco lumínico.

Como se puede observar en la figura 7, la curva sigue aproximadamente la forma de $\frac{1}{x^2}$ concordando con la Ley Inversa del Cuadrado que postula que la intensidad de luz disminuye con el cuadrado de la distancia a donde se origina.

Esta respuesta del sensor no nos interesa pues perdemos mucha resolución a partir de 20 cm, lo que vamos a hacer para mejorar el funcionamiento es obviar el valor de 0 cm pues por software podemos ajustar que cuando la lectura sea mayor que el valor de 5 cm la neurona correspondiente valga 1. Además, resulta improbable que los robots estén tan cerca, como ya se ha comentado. Dado que nuestro interés es poder saber el color de la luz que hay en los alrededores del robot, lo que implica distancias inferiores a 60 cm; se aproximará su comportamiento a una recta, para lo cual usamos otro dato de luz, tapando el sensor, obteniendo para el filtro azul un valor de 256, que se corresponde con el 0 de la neurona. Usando ambos puntos se trazó una gráfica con los 2 puntos límites y ajustamos a una recta, la cual usaremos para determinar el valor entre 0 a 1 que va a tener la neurona (Figura 8).

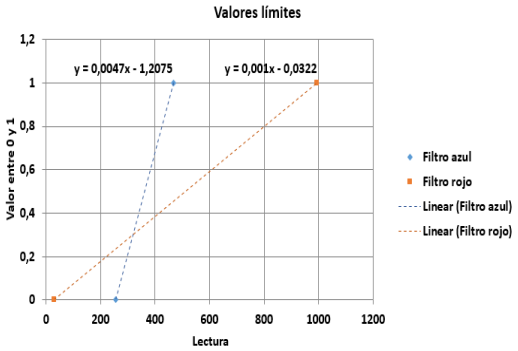


Fig. 8: Rectas trazadas y puntos límites para ambos filtros. En azul los límites y trazado del filtro azul, y en naranja los respectivos del filtro rojo.

Para el caso del filtro rojo se ha procedido de la misma manera que para el filtro azul, cambiamos el color del led a rojo y obtenemos la gráfica de lecturas del sensor en función de la distancia que vemos en la figura 9.

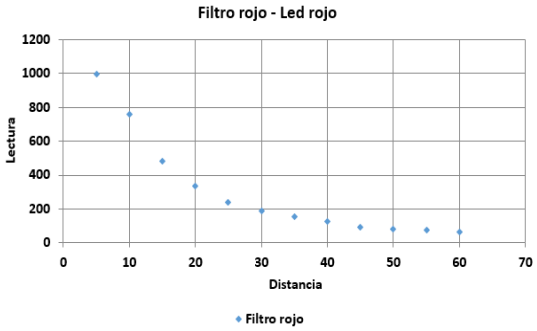


Fig. 9: Variación bruta lectura filtro rojo con luz roja respecto de la distancia al foco lumínico.

Una vez obtenidas estas medidas comprobamos que la forma es similar a la del filtro azul como era de esperar. Ahora pasamos a ajustar los datos tal y como hicimos con el filtro azul. Usamos como primer dato el de 5 cm y para el caso de tapar el sensor en el filtro rojo obtenemos un valor de 31, con esto hacemos el ajuste lineal para obtener los valores entre 0 y 1. El ajuste obtenido se muestra en la figura 8, pintado en color naranja.

IV. Talleres de robótica evolutiva para escolares de altas capacidades.

Una vez diseñado, construido y testado el prototipo de robot, tal como se ha descrito en los anteriores apartados, pasamos a describir las líneas generales y la justificación del taller de robótica que se impartirá a jóvenes de altas capacidades, como parte del proyecto del Museo de la Ciencia y el Cosmos que se mencionó en la Introducción. Lo haremos distinguiendo las dos facetas principales del proyecto, la faceta científica (biológica) y la faceta técnica (ingeniería).

Motivación desde el punto de vista de la biología

La teoría de Darwin ("evolución de los seres vivos mediante selección natural") está bien establecida en biología: como decía T. Dobzhansky, "nada tiene sentido en biología si no es a la luz de la evolución darwiniana". Sin embargo, se ha estudiado mucho menos el papel de la teoría darwiniana en la evolución de los sistemas complejos no-vivos. Solo ahora se empieza a entender la evolución cultural de sistemas de ideas ("memes"), tales como los lenguajes humanos, los de los chimpancés, las ballenas, etc. Richard Dawkins y Daniel Dennet son dos de los máximos exponentes de la investigación en curso y han escrito numerosos artículos y libros sobre ello.

La evolución de sistemas físicos complejos no-vivos ("artefactos") es aún menos conocida y estudiada, aunque no por eso menos importante. El desarrollo acelerado que estamos viviendo en robótica e inteligencia artificial posibilita diseñar experimentos evolutivos con colonias de robots, llevarlos a cabo con medios materiales y en escalas de tiempo razonables, e investigar sobre las reglas que gobiernan la evolución de esos sistemas y sus posibles aplicaciones. Es en ese contexto donde se enmarca el proyecto CosmoBots del Museo de la Ciencia y el Cosmos, el diseño y construcción del prototipo de robot que hemos descrito más arriba y la realización de los talleres para jóvenes de altas capacidades.

Motivación desde el punto de vista de la ingeniería

Desde el punto de vista de la ingeniería, el curso se concibe como una oportunidad de introducir a estos estudiantes en el mundo de la ingeniería, ofreciendo un acercamiento a diversas herramientas, campos y también una formación inicial en habilidades claves para un ingeniero.

La base del curso gira en torno a la programación. Conocerán el uso de sensores y actuadores y su comunicación mediante el Arduino Nano, que constituye una plataforma ideal para iniciarse en el mundo de la robótica. El tratamiento de la información recogida con los sensores implica que los alumnos tendrán que comprender la lógica habitualmente utilizada en informática para resolver con algoritmos los procesos que ocurren en el software del robot, con los conocimientos matemáticos que ello implica.

Por otro lado, algunas clases estarán destinadas al diseño 3D por lo que los estudiantes desarrollarán su visión espacial, una habilidad también necesaria en el ámbito de la ingeniería. Además, se acercarán al uso de un programa de diseño profesional de Autodesk, participando en la fase de diseño de un producto, en este caso robots, y en la fase de producción, pudiendo imprimir su robot utilizando una impresora 3D.

Por último, se puede mencionar que se mostrará el funcionamiento de distintas tecnologías, como es el caso de las cámaras fotográficas. Los estudiantes fabricarán un sensor similar al filtro Bayer, y se explicará su relación con los elementos fotosensibles de las cámaras.

Otras tecnologías, como las empleadas para el control de motores, la electrónica de potencia, regulación de tensión y electrónica digital, les serán introducidas y podrán, en especial, trabajar y comprender el problema que lleva al uso de dichas tecnologías, trabajándose de forma básica una competencia fundamental para cualquier ingeniero, la resolución de problemas.

Desde el punto de vista de la física, se les introducirá a conceptos como energía, pérdidas de energía y consumo energético. Estas nociones básicas les servirán de ayuda en el futuro cuando expandan sus conocimientos en su área de especialización, y principalmente servirán para establecer unos fundamentos que les permiten acometer conceptos más complejos, sentando, por tanto, unas bases sólidas

que les atraiga hacia las ciencias en general y que les ayude en su futuro como estudiantes.

Todo lo mencionado se realizará de forma experimental, ya que la actividad está concebida como un taller, y la dificultad se ajustará en relación a la edad de los estudiantes, que se separarán en cuatro grupos según sus capacidades y competencias. Además, cada uno de esos grupos, de diez alumnos, contará con dos monitores. Esta ratio es óptima para que puedan adquirir una visión a introductoria personalizada en las distintas áreas de la ingeniería. El objetivo de los talleres es motivar a los jóvenes para que posteriormente continúen aprendiendo y sigan desarrollando las habilidades adquiridas.

V. Conclusiones

La robótica resulta una disciplina perfecta para la docencia en talleres, especialmente para aquellos destinados a escolares sin experiencia previa. Su carácter multidisciplinar y eminentemente práctico le otorga un rol preferente de cara a que los escolares puedan aprender de forma interactiva, poniendo en práctica los conocimientos adquiridos.

Asimismo, basando los talleres en un experimento de robótica evolutiva, se consigue que los estudiantes puedan trabajar conceptos más allá de la ingeniería, acercándolos a las ciencias en general y, en este caso, a la biología evolutiva.

En paralelo, la unión de ambas disciplinas supone un reto para el colectivo de escolares de altas capacidades, sirviendo, por tanto, como una motivación para que los alumnos puedan desarrollar un interés por las ciencias, y que dicho interés influya de manera positiva en su formación futura.

VI. Información complementaria

La información complementaria del artículo puede ser consultada en https://gitlab.com/articulo48/genbots_v2.git e incluye el código empleado durante las pruebas, así como una hoja de cálculos donde se pueden consultar los datos y gráficas presentes en el artículo.

VII. Referencias

[1] D. Floreano, S. Mitri, S. Magnenat, L.Keller, “Evolutionary conditions for the Emergence of Communication in Robots”, Laboratory of Intelligent Systems, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982207009281

[2]Manufacturer: DFRobot. Datasheet source: https://www.mouser.com/catalog/specsheets/TCS3200-E11.pdf

[3]Manufacturer: Texas Instrument. Datasheet source: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74hct139.pdf

[4]Manufacturer: Texas Instrument. Datasheet source: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn7400.pdf

[5]Manufacturer: Texas Instrument. Datasheet source: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/l293.pdf

[6]Manufacturer: Central Semiconductor. Datasheet source: https://www.mouser.com/ds/2/68/2n2221-28620.pdf

[7]Manufacturer: RECOM Power. Datasheet source: https://www.mouser.com/ds/2/468/R-78xx-1.0-958426.pdf

[8]Manufacturer: Vishay Semiconductors. Datasheet source: https://www.mouser.com/ds/2/427/tept4400-244748.pdf

Iluminando a través de la robótica educativa

Pedro Plaza
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Control (DIEEC) (UNED)
Madrid, España
pplaza@plazarobotica.es

German Carro
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Control (DIEEC) (UNED)
Madrid, España
germancf@ieee.org

Manuel Blazquez
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Control (DIEEC) (UNED)
Madrid, España
manuel.blazquez.merino@gmail.com

Elio Sancristobal
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Control (DIEEC) (UNED)
Madrid, España
elio@ieec.uned.es

Manuel Castro
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Control (DIEEC) (UNED)
Madrid, España
mcastro@ieec.uned.es

Félix García-Loro
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Control (DIEEC) (UNED)
Madrid, España
fgarcialoro@ieec.uned.es

***Abstract*— La robótica y el pensamiento computacional son herramientas ideales para desarrollar la pedagogía ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM). Hoy en día, las herramientas de robótica educativa surgen con el objetivo de promover la innovación y la motivación de los estudiantes durante el proceso de aprendizaje. Los robots se están volviendo más comunes en nuestra vida diaria; por lo tanto, es importante integrar robots en todos los niveles de nuestra sociedad. Este demostrador se centra en impulsar el mismo contenido a través de tres herramientas educativas robóticas de bajo coste. La primera es Scratch, se pueden programar historias interactivas, juegos y animaciones. La segunda herramienta es Crumble, es un controlador programable fácil de usar. Su interfaz de programación utiliza un lenguaje de programación por bloques que facilita su uso. Por último, Arduino es una plataforma de código abierto basada en hardware y software fácil de utilizar y con gran potencial para el desarrollo de aplicaciones robóticas. Este demostrador tiene como objetivo presentar las plataformas mencionadas como herramientas de robótica educativa como el primer paso para entrar en el mundo de la robótica. A lo largo de este demostrador se desarrolla una iniciación a la robótica educativa.**

Keywords— educación; programación; robótica; STEM

I. INTRODUCCION

Este trabajo se enmarca en la educación ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM) combinada con la robótica educativa. Además, la robótica combinada con STEM proporciona una manera atractiva de transformar conceptos aburridos en un divertido proceso de aprendizaje. La robótica se está utilizando como la modernización y la mejora para la mayoría de los procesos [1]. Por lo tanto, hay una necesidad de formación en el contexto de la robótica.

La tecnología se está mejorando y expandiendo día a día y cada vez más en nuestra vida cotidiana. Internet, las redes sociales, la conectividad y los dispositivos móviles nos llevan a un mundo cada vez más conectado, lo que ha generado un gran cambio en nuestra manera de relacionarnos y comunicarnos. Este escenario hiperconectado está afectando a las relaciones entre individuos y está introduciendo nuevas oportunidades y nuevos retos [2].

La educación es una herramienta poderosa que está siendo más popular en estos días. La demanda de graduados en ciencias, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM) ha aumentado constantemente en las últimas décadas. Sólo en Estados Unidos, se espera que los puestos de trabajo para ingenieros biomédicos aumenten un 62% para 2020, y se espera que los puestos de trabajo en desarrollo de software y ciencia médica aumenten un 32% y un 36%, respectivamente. Combinado con un número insuficiente de estudiantes matriculados en los campos STEM, esto resultará en cerca de 2.4 millones de empleos STEM vacantes para el 2018 [3].

La tecnología educativa es una herramienta con gran potencial que aumenta su presencia día a día. Algunos ejemplos son los proporcionados por [4] como parte de la red eMadrid.

Sin embargo, la introducción a la robótica no es una tarea sencilla. En primer lugar, la robótica combina mecánica, electricidad, electrónica e informática con el propósito de diseñar y construir aplicaciones robóticas. Los robots son máquinas electromecánicas programables que incluyen sensores para tomar decisiones y adaptarse a diferentes situaciones.

Además, la robótica también proporciona una forma atractiva de transformar conceptos aburridos en un divertido proceso de aprendizaje. Los kits robóticos facilitan la facilidad con la que los estudiantes pueden hacer conexiones entre las disciplinas STEM [5]. La referencia [6] presenta la integración completa de plataformas robóticas móviles para entornos educativos compactas construidas alrededor de una placa controladora Arduino en el Sistema Operativo Robótico (ROS). La robótica está siendo utilizada como la modernización y mejora de la mayoría de los procesos. Esto ocurre porque los robots pueden integrarse fácilmente en los procesos industriales actuales [7].

La referencia [8] aporta información sobre un proyecto conjunto ejecutado por el Departamento de Electrónica de una Institución Federal en Brasil y un instituto público. Se usa la plataforma Arduino formaba parte de la configuración de adquisición y control de un conjunto de experimentos. Por otro lado, tal y como se describe en [9], se usan diferentes sistemas sensoriales que se implementan utilizando la plataforma de hardware abierta Arduino. Estos proyectos son desarrollados

por estudiantes del último curso de Licenciatura en Física de la Universidad de Sevilla. También se plantea el uso de un sistema de robótica educativa basado en lógica programable y Arduino con la finalidad de disponer de flexibilidad, modularidad y colaboración [10]. Además, [11] propone un nuevo bus para el desarrollo de sistemas embebidos. Se basa en el uso de conectores de paso de 2,0 mm que permiten la conexión simultánea de las tarjetas a una placa base o su apilamiento directo. Está diseñado específicamente para su uso con plataformas de hardware libre como Arduino, Raspberry o Beaglebone. La estrategia propuesta permite el uso de estas tarjetas de E/S en varias plataformas como host.

Este demostrador tiene una duración de 90 minutos. La agenda está dividida en cinco bloques principales. El primer bloque introduce la pedagogía STEM y la educación en robótica, así como sus antecedentes. Además, se proporciona una descripción general del demostrador. En un segundo paso, se presenta la herramienta Scratch y el contenido multiplataforma se desarrolla con Scratch. En un tercer paso, se presenta la herramienta Crumble y se trabaja con Crumble. Como cuarto paso, se presenta Arduino y trabaja con Arduino. Finalmente, se reserva un tiempo para discutir sobre el contenido y las experiencias.

La experiencia previa en programación o robótica no es necesaria debido a la naturaleza de las herramientas utilizadas y el contenido.

El objetico principal de esta actividad es dotar a las personas asistentes de herramientas para el desarrollo de una metodología pedagógica basada en proyectos y herramientas que permiten promover los experimentos, donde la prueba y el error es parte del aprendizaje y el autodescubrimiento.

Dada la naturaleza del contenido del curso y la metodología pedagógica empleada, no se requiere titulación o formación previa, sólo son necesarias ganas de aprender, descubrir y disfrutar.

Este artículo está dividido en 4 secciones. La sección II describe las herramientas de robótica educativa usadas. Esta sección incluye tanto información de los desarrolladores, como detalles del entorno de programación. Además, se incluye un conjunto de elementos hardware usados a lo largo del taller. La Sección III resume el contenido del demostrador. También se describe la estructura del demostrador. La última sección recoge las conclusiones del material presentado.

II. MATERALES USADOS

A continuación, se incluye una breve descripción de cada una de las herramientas de robótica educativa usadas a lo largo del demostrador. Se incluyen detalles como precio, facilidad de uso y el rango de edades recomendable para su uso.

A. Scratch

Scratch fue desarrollado por la división de Educación del MIT (Massachusetts Institute of Technology). La misión del Instituto Tecnológico de Massachusetts es avanzar el conocimiento y educar a los estudiantes en ciencias, tecnología y otras áreas de becas que mejor servirán a la nación y al mundo en el siglo XXI. Historias interactivas, juegos y animaciones pueden ser programados con Scratch [12].

Scratch se proporciona de forma gratuita, es muy sencilla de usar y es perfectamente válida para edades desde los 6 años en adelante.

La Figura 1 muestra el aspecto del interfaz de desarrollo de Scratch. Se trata de un entorno de programación por bloques que facilita a los alumnos el acceso a la programación.

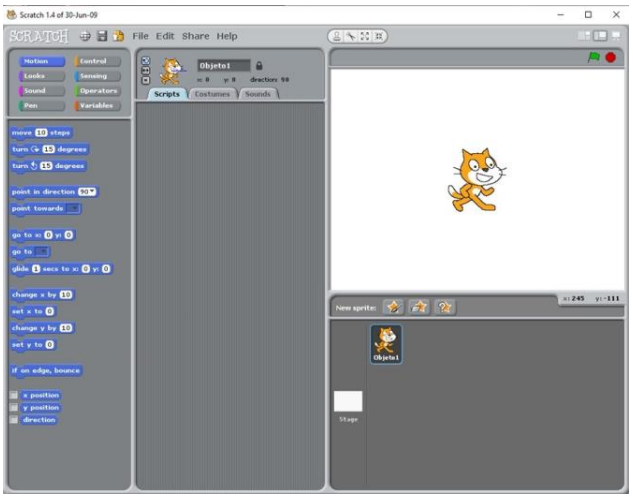


Fig 1. Scratch IDE.

Los autores en [13] describen un taller celebrado como parte del evento internacional Scratch Day, donde utilizan Scratch como herramienta para la introducción a la robótica educativa.

La Figura 2 muestra un ejemplo de aplicación con Scratch. Se trata de un robot sigue líneas implementado con Scratch.

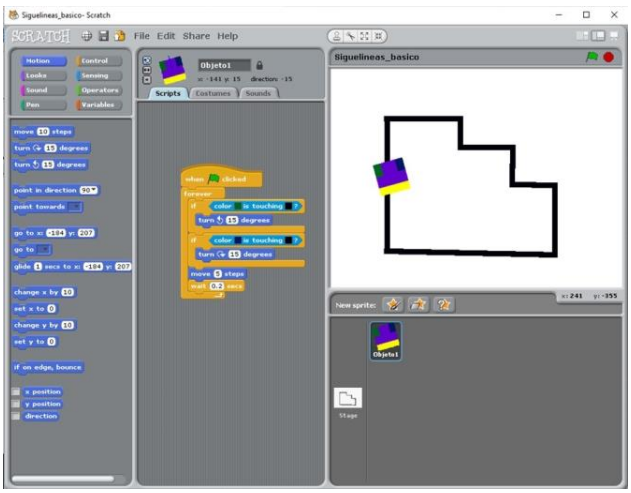


Fig 2. Ejemplo de sigue líneas con Scratch.

B. Crumble

Crumble es una tarjeta electrónica a la que se pueden conectar hasta dos motores, luces, interruptores y sensores para controlar su funcionamiento. Se conecta al PC a través de USB

y puede programarlo mediante el software gratuito. Redfern Electronics se encarga de fabricarlos y se pueden obtener algunos accesorios que son compatibles con la tarjeta Crumble [14].

El software de Crumble se proporciona de forma gratuita la controladora tiene un precio de 10 £. Su uso es muy sencillo, pero incorpora componentes hardware y mecánicos que limitan la edad mínima de los usuarios. Es perfectamente válida para edades desde los 8 años en adelante.

El controlador Crumble es una tarjeta que es capaz de manejar motores, sensores analógicos y digitales, Sparkles y servos.

La Figura 3 muestra un ejemplo de kit robótico de Crumble montado. Esta plataforma robótica incluye el controlador Crumble, dos motores DC (Corriente Directa) con ruedas, una Sparkle, un portapilas con interruptor integrado, diferentes elementos mecánicos y cables para conectar eléctricamente los componentes.

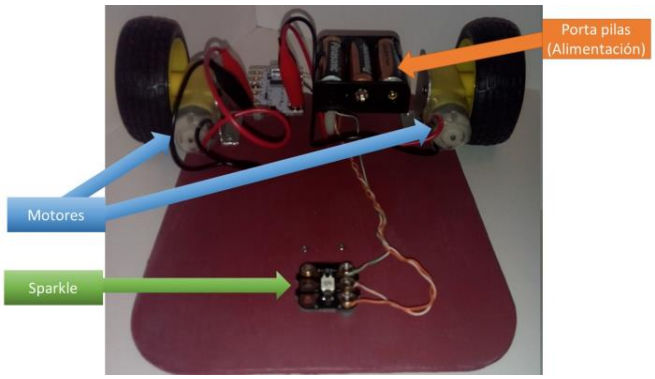


Fig 3. Ejemplo de kit robótico de Crumble.

La Figura 4 muestra el aspecto del interfaz de desarrollo de Crumble. También, se trata de un entorno de programación por bloques que facilita a los alumnos el acceso a la programación. Con Crumble, los alumnos pueden acceder a la interacción de componentes eléctricos y electrónicos de una manera sencilla, ya que las conexiones y elementos usados son simples.

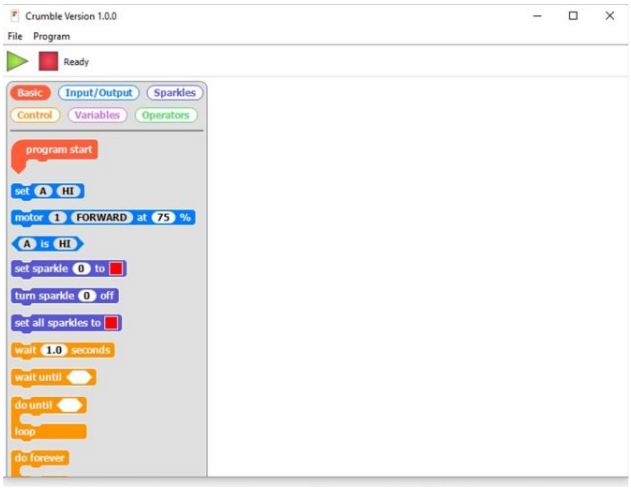


Fig 4. Crumble IDE.

A lo largo de [15] se presenta una nueva forma de utilizar la robótica. En lugar de utilizar robots en aulas o laboratorios remotos, la propuesta es utilizar robots en casa.

La Figura 5 muestra una controladora Crumble con portapilas y un Sparkle. Se trata de un montaje para trabajar aplicaciones con luces.

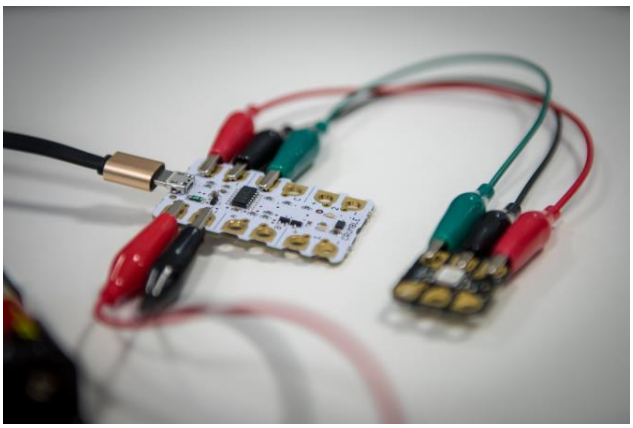


Fig 5. Montaje Crumble para aplicaciones con luces.

C. Arduino

Arduino fue lanzado por Massimo Banzi en 2005 como una herramienta modesta para los estudiantes de Banzi en el Instituto de Diseño de Interacción Ivrea (IDII). Arduino es una plataforma electrónica de código abierto basada en hardware y software fácil de usar [16]. Es una plataforma que incorpora un simple microcontrolador y un entorno de desarrollo de interfaz para crear las aplicaciones a descargar en la placa. El uso de los proyectos Arduino abarca un amplio abanico de aplicaciones, desde la robótica hasta los sistemas de riego de control automático.

El software de Arduino se proporciona de forma gratuita la controladora tiene un precio de 20 €. Su uso es muy sencillo, pero requiere programación textual. También incorpora componentes hardware y mecánicos que limitan la edad mínima de los usuarios. Es perfectamente válida para edades desde los 12 años en adelante.

El sitio web de Arduino proporciona diferentes maneras de usar Arduino:

- Editor Web Arduino.
- Arduino IDE para diferentes sistemas operativos (Windows, Debian / Ubuntu y Mac OS X).

La Fig. 6 muestra un ejemplo de kit de robot Arduino montado. Esta plataforma robótica incluye el controlador Arduino, dos motores de corriente continua con ruedas y un portapilas.

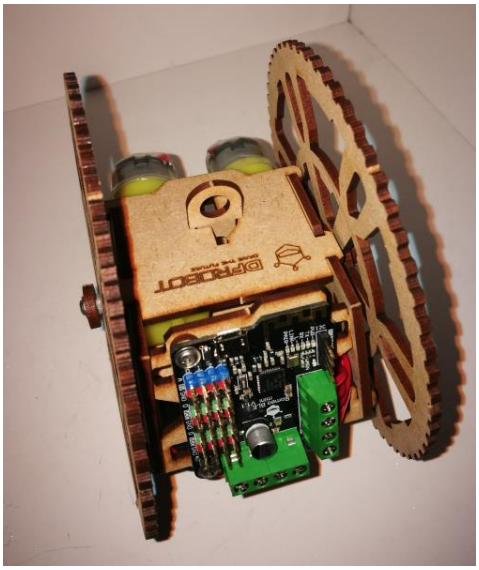


Fig 6. Ejemplo de kit robótico de Arduino.

La Figura 7 muestra el aspecto del interfaz de desarrollo de Arduino. En este caso, el entorno de programación usa lenguaje textual, lo cual implica un grado de complejidad frente a Scratch y Crumble. Con Arduino, los alumnos pueden acceder a la interacción de componentes eléctricos y electrónicos sin ningún tipo de limitaciones. Las tarjetas de Arduino incluyen un gran número de entradas y salidas, de tipo digital y analógico. Además, este tipo de tarjetas incluyen una gran variedad de protocolos de comunicación serie, como son el puerto serie, comunicación I2C (Inter-Integrated Circuit) y comunicación SPI (Serial Peripheral Interface).

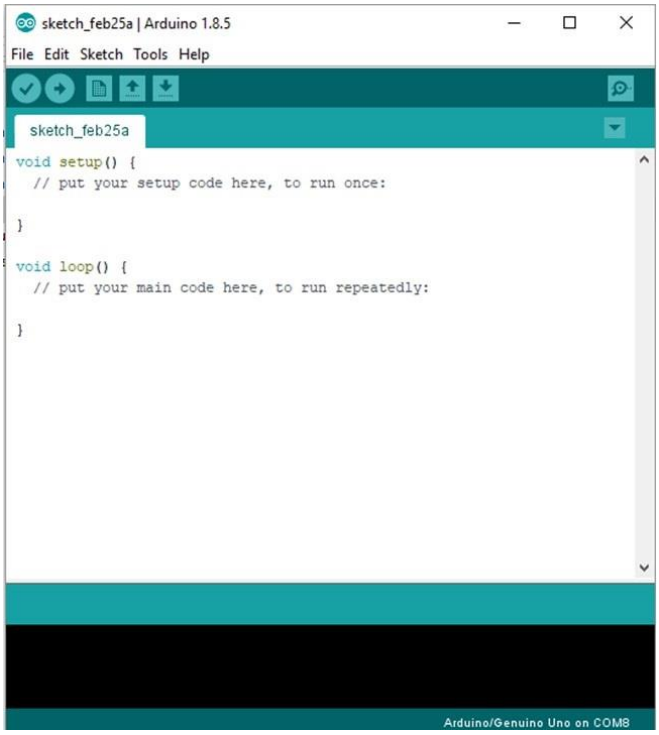


Fig 7. Arduino IDE.

La referencia [17] presenta la evolución de un simple robot remoto de 4 ruedas a una plataforma escalada actualmente en desarrollo. Estas plataformas desarrolladas están basadas en Arduino y están destinadas a ser utilizadas con fines educativos en el contexto de la educación STEM.

La Figura 8 muestra una controladora Arduino con un Shield protoboard y un LEDs (Light Emitter Diode). Se trata de un montaje para trabajar aplicaciones con luces.

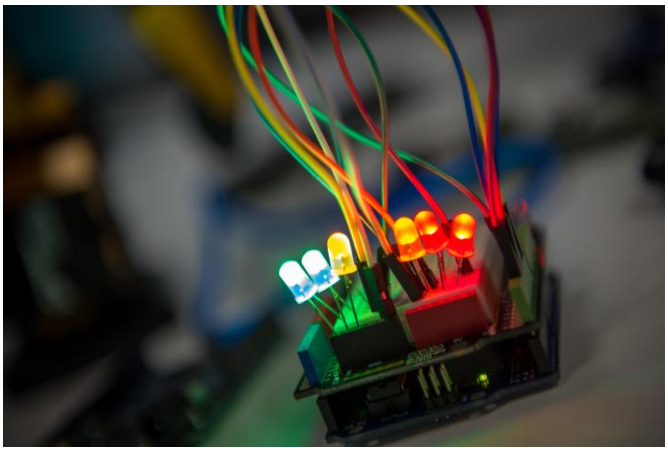


Fig 8. Montaje Arduino para aplicaciones con luces.

III. DESARROLLO DEL DEMOSTRADOR

Durante los 15 primeros minutos se detallan los antecedentes y se resume el contenido del demostrador. La robótica combina la mecánica, la electricidad, la electrónica y la informática con el propósito de diseñar y construir aplicaciones de robótica. Por lo tanto, el primer paso para introducirse en la robótica debería ser la adquisición de habilidades de programación y habilidades mecatrónicas básicas.

Durante los siguientes 20 minutos se desarrolla el contenido relativo a Scratch. Las historias interactivas, juegos y animaciones se pueden programar con Scratch. Se utiliza Scratch para implementar un automatismo básico y ampliamente conocido, un semáforo de tráfico.

Durante los siguientes 20 minutos se desarrolla el contenido relativo a Crumble. Crumble permite gestionar hasta 32 LED (diodos emisores de luz) RGB (rojo, verde y azul) de forma independiente y utilizando una resolución de color de 24 bits. En esta parte, el semáforo de tráfico se implementa utilizando Crumble.

Durante los siguientes 20 minutos se desarrolla el contenido relativo a Arduino. Arduino permite desarrollar una amplia gama de aplicaciones, desde la robótica hasta los sistemas de riego de control automático. Finalmente, el semáforo de tráfico está construido en Arduino.

El objetivo de estas tres partes es obtener un acceso directo a las herramientas Scratch, Crumble y Arduino. La Figura 9 muestra los objetivos de cada una de ellas.

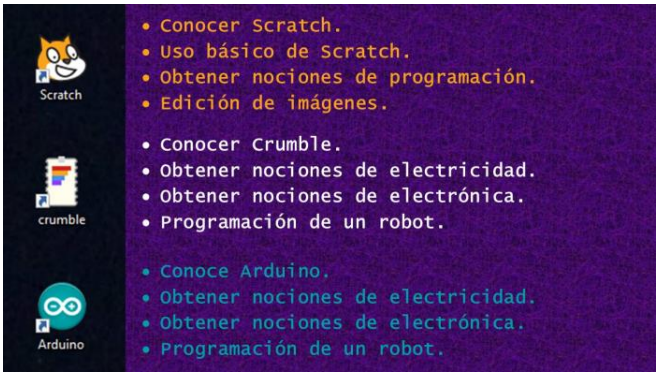


Fig 9. Objetivos que alcanzar con Scratch, Crumble y Arduino.

Durante los últimos 15 minutos se procede a la discusión. En este punto, se abre una discusión con el objetivo de intercambiar impresiones y obtener retroalimentación de los asistentes. La discusión se centra en cómo la robótica educativa puede ser buena para motivar a los estudiantes jóvenes a las disciplinas básicas, como las matemáticas y la física.

A. Antecedentes y visión general del demostrador

La educación robótica se está haciendo muy popular en estos días. Robots simples están siendo utilizados dentro de STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas) Educación como una herramienta poderosa que facilita la manera de enseñar el conocimiento STEM. Además, la robótica también proporciona una manera atractiva de transformar conceptos que los estudiantes perciben como aburridos en un divertido proceso de aprendizaje. La robótica está siendo utilizada como la modernización y mejora de la mayoría de los procesos. Esto ocurre porque los robots pueden integrarse fácilmente en los procesos industriales actuales. Además, la robótica se ha convertido en una herramienta importante para que los estudiantes participen en STEM. Sin embargo, la introducción a la robótica no es una tarea sencilla. En primer lugar, la robótica combina mecánica, electricidad, electrónica e informática con el propósito de diseñar y construir aplicaciones robóticas. Los robots son máquinas electromecánicas programables que incluyen sensores y actuadores para tomar decisiones y adaptarse a diferentes situaciones. Por lo tanto, el primer paso para introducirse en la robótica debería ser la adquisición de habilidades de programación y habilidades mecatrónicas básicas.

Durante los primeros 15 minutos del taller se describe la robótica como un factor clave para la educación STEM.

B. Controlando luces con Scratch

El demostrador utiliza Scratch para implementar un automatismo básico y ampliamente conocido, un semáforo de tráfico. La siguiente parte del demostrador se desarrolla con el uso de Scratch como herramienta de robótica educativa.

Los objetivos de la segunda parte son los siguientes:

- Conocer Scratch.
- Uso básico de Scratch.
- Obtener nociones de programación.
- Edición de imágenes.

A lo largo de esta parte se desarrollan diferentes actividades con el objetivo de familiarizarse con Scratch y su interfaz de desarrollo (ver Figura 1). En primer lugar, se muestran los paneles de Scratch. Esta actividad pretende que los asistentes tengan un primer contacto. Para ello, se muestran los tres paneles en los que está dividida la herramienta Scratch. Estos son: el panel de comandos, el panel de programación y el panel de visualización.

A continuación, se detallan los elementos que componen los paneles de Scratch. Las agrupaciones de comandos: en primer lugar, se revisan los comandos. En la parte superior del panel de comandos se pueden ver las categorías de comandos. En la parte inferior de este panel se muestran los comandos agrupados en la categoría seleccionada. El panel de programación es presentado como el lienzo para el cual se pueden crear los Sprites o el fondo. El panel de visualización: el último panel se presenta como la zona en la que se puede ver el fondo y los Sprites donde ejecutan sus programas. En la parte inferior del panel de visualización se puede seleccionar el fondo y los diferentes Sprites.

En este momento se plantea la actividad común para las tres herramientas, crear un semáforo. Durante esta actividad, el instructor explica el aspecto y el comportamiento de un semáforo. Los semáforos tienen luces para regular el paso de vehículos y luces para regular el paso de peatones.

Posteriormente, se pasa a realizar las diferentes tareas. En primer lugar, editar el fondo. Se trabaja con el editor de imágenes para el fondo para crear el armazón del semáforo. El siguiente paso es crear los Sprites. En este punto, se trabaja de nuevo con el editor de imágenes, pero en este caso para crear los Sprites. Cada luz se crea como un Sprite. Tres Sprites como luces para regular el paso de vehículos y otros dos Sprites más como luces para regular el paso de peatones.

En este momento se da paso a la programación de los Sprites. Se incluye la programación de los Sprites creados previamente.

Por último, se trabaja en la sincronización del semáforo. De forma similar a la actividad anterior, se coordinan los aspectos del Sprite con el objetivo de conseguir el comportamiento real de un semáforo.

C. Controlando luces con Crumble

A lo largo de esta parte del demostrador se desarrolla con el uso de Crumble como herramienta de robótica educativa.

Los objetivos de la tercera parte son los siguientes:

- Conocer Crumble.
- Obtener nociones de electricidad.
- Obtener nociones de electrónica.
- Programación de un robot.

A lo largo de esta parte se desarrollan diferentes actividades con el objetivo de familiarizarse con Crumble y su interfaz de

desarrollo (ver Figura 4). En primer lugar, se presenta el controlador Crumble: esta actividad tiene como objetivo que los asistentes tengan un primer contacto con el hardware Crumble. Para ello, se detallan los puertos Crumble: el puerto de programación USB, los puertos de alimentación, los puertos de control del motor, el puerto de control de Sparkle y las cuatro entradas/salidas de propósito general.

En segundo lugar, se describe el software Crumble. En primer lugar, se revisaron los comandos. En la parte superior del panel de comandos se pueden ver las categorías de comandos. En la parte inferior de este panel se muestran los comandos agrupados en la categoría seleccionada. Además, también se describe el panel de programación. Este panel fue presentado como el lienzo de los programas.

Una vez presentados los elementos básicos con los que se va a trabajar, se presentan los diferentes elementos que componen una aplicación robótica. El sistema de alimentación se presenta como un elemento básico para robots.

También se incluye una breve descripción de los motores eléctricos. Aunque en este demostrador no se va a hacer uso de ellos, Crumble es capaz de manejar dos motores de corriente continua. Por eso, se aprovecha para mencionar información básica de ellos. Para los robots móviles, los motores eléctricos son elementos clave. Por lo tanto, se proporciona una descripción simple de ellos para los asistentes. El motor eléctrico puede transformar la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa.

Otro elemento comúnmente usado en robótica son los LEDs. Además, este demostrador está basado en estos elementos. Durante esta actividad, el instructor describe un LED como un dispositivo electrónico que produce luz cuando se le aplica energía eléctrica.

En un siguiente paso se describen las conexiones eléctricas. En este punto se trabaja en las conexiones entre el controlador Crumble, una fuente de alimentación y un Sparkle.

Una vez realizadas las conexiones eléctricas, se procede a realizar el primer programa con Crumble. En este punto, se trabaja en la programación. El objetivo es conseguir que la iluminación Sparkle tenga el color deseado. Posteriormente se modifica la programación para que el aspecto de Sparkle sea intermitente.

Finalmente, de forma similar a la actividad anterior, se realiza la coordinación de los aspectos de Sparkle con el objetivo de conseguir el comportamiento de un semáforo.

D. Controlando luces con Arduino

La penúltima parte del demostrador se desarrolla con el uso de Crumble como herramienta de robótica educativa.

Los objetivos de la cuarta parte son muy similares a los objetivos planteados en el apartado III, sección C, pero haciendo uso de Arduino.

A lo largo de esta parte se desarrollan diferentes actividades con el objetivo de familiarizarse con Arduino y su interfaz de desarrollo (ver Figura 7). En primer lugar, se presenta el controlador Arduino. Esta actividad tiene como objetivo que los asistentes tengan un primer contacto con el hardware Arduino. Para ello, se detallan los puertos Arduino: el puerto de programación USB, los puertos de alimentación y las entradas/salidas de propósito general.

Por otro lado, se presenta el software Arduino. En primer lugar, se revisa un ejemplo sencillo. En la parte superior del ejemplo, se puede ver la zona de instalación. En la parte inferior de este ejemplo, se presenta el bucle principal para el código. El bucle principal se utiliza para mantener los comandos de los programas.

Una vez presentados los elementos básicos con los que se va a trabajar, se presentan los diferentes elementos que componen una aplicación robótica. El sistema de alimentación se presenta como un elemento básico para robots.

También se incluye una breve descripción de los motores eléctricos. Aunque en este demostrador no se va a hacer uso de ellos, Arduino es capaz de manejar motores de corriente continua cuando se le añade la electrónica apropiada. Por eso, se aprovecha para mencionar información básica de ellos. Para los robots móviles, los motores eléctricos son elementos clave. Por lo tanto, se proporciona una descripción simple de ellos para los asistentes. El motor eléctrico puede transformar la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa.

Otro elemento comúnmente usado en robótica son los LEDs. Además, este demostrador está basado en estos elementos. Durante esta actividad, el instructor describe un LED como un dispositivo electrónico que produce luz cuando se le aplica energía eléctrica.

En un siguiente paso se describen las conexiones eléctricas. En este punto se trabaja en las conexiones entre el controlador Arduino, una fuente de alimentación y un LED.

Una vez realizadas las conexiones eléctricas, se procede a realizar el primer programa con Arduino. En este punto se trabaja en la programación. El objetivo es que el LED parpadee en la frecuencia deseada. Posteriormente, se procede a conectar dos LEDs más. Ahora, se modifica la programación para hacer que los LEDs parpadeen en la frecuencia deseada.

Finalmente, de forma similar a la actividad anterior, se realiza la coordinación de los diferentes LEDs incluidos en el montaje con el objetivo de conseguir el comportamiento de un semáforo.

E. Discusión

En este punto, se abre una discusión con el objetivo de intercambiar impresiones y obtener retroalimentación de los asistentes. Para ello, se reservan un total de 15 minutos del taller. La discusión se centra en cómo la robótica educativa puede ser buena para motivar a los estudiantes jóvenes a disciplinas básicas, como las matemáticas y la física. Los estudiantes piensan que estas disciplinas son demasiado complicadas y abstractas, pero con las aplicaciones en robótica, los estudiantes pueden ver cuán útiles pueden ser estas disciplinas.

IV. CONCLUSIONES

El demostrador expuesto muestra un conjunto de herramientas que pueden ser usadas en aulas para elaborar programas educativos relacionados con robótica en un entorno de desarrollo colaborativo para potenciar la innovación y la motivación de los alumnos durante el proceso de aprendizaje. Cuando se usan herramientas de robótica educativa es importante incluir tareas divertidas entrelazadas con desafíos planteados para aplicar la teoría en la resolución de problemas. Tanto Scratch, como Crumble, así como Arduino son buena opciones cuando se trata de introducir la robótica de una manera económica, simple y conveniente para que los profesores desarrollen conceptos escalables. Además, los estudiantes encuentran que la programación es una actividad agradable mientras adquieren los conceptos STEM. Este demostrador se puede integrar en las asignaturas de tecnología, programación y robótica que se imparten en diferentes Comunidades Autónomas. Hay gran variedad de contenidos que pueden ser desarrollados con estas tres herramientas con la finalidad de adaptar la dificultad de su uso a las diferentes edades de los alumnos.

Finalmente, los resultados se integrarán en una plataforma Open Hardware que favorece la innovación y motivación de los alumnos durante el proceso de aprendizaje [10]. La plataforma que se está desarrollando presenta conexiones inalámbricas como Bluetooth y WiFi como mejoras [18]. Esta investigación continúa el desarrollo descrito en [19]. La tesis doctoral se está llevando a cabo en la Facultad de Ingeniería Industrial de la UNED (Universidad Politécnica Española de Educación a Distancia) y en el Departamento de Ingeniería Eléctrica e Informática (DIEEC).

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen el apoyo prestado por la Escuela Industrial de Ingeniería de la UNED, la Escuela de Doctorado de la UNED y el "Techno-Museo: Discovering the ICTs for Humanity" (IEEE Foundation Grant #2011-118LMF).

Y el apoyo parcial del proyecto eMadrid (Investigación y Desarrollo de Tecnologías Educativas en la Comunidad de Madrid) - S2013/ICE-2715, proyecto IOT4PYME (Internet de las cosas para la pequeña y mediana empresa europea), Erasmus+ Asociación Estratégica nº 2016-1-IT01-KA202-005561), mEquity (Impulso de la calidad de la educación superior en Jordania mediante el uso de las tecnologías móviles para una mejor integración de los grupos desfavorecidos en Jordania.

REFERENCIAS

[1] G. Carro, S. Martin, E. Sancristobal, F. Mur and M. Castro, "Robotics, the New Industrial Revolution," in IEEE Technology and Society Magazine, vol. 31, no. 2, pp. 51-58, Summer 2012. DOI: 10.1109/MTS.2012.2196595

[2] M. Settembre, "Towards a hyper-connected world," 2012 15th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (NETWORKS), Rome, 2012, pp. 1-5. DOI: 10.1109/NETWKS.2012.6381667

[3] E. Susilo et al., "STORMLab for STEM Education: An Affordable Modular Robotic Kit for Integrated Science, Technology, Engineering, and Math Education," in IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 23, no. 2, pp. 47-55, June 2016. DOI: 10.1109/MRA.2016.2546703

[4] C. Delgado Kloos, P. Rodríguez, Á. Velázquez-Iturbide, M. C. Gil, B. Fernández-Manjón and E. Tovar, "Digital education in the classroom," 2017 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), Athens, 2017, pp. 31-32. DOI: 10.1109/EDUCON.2017.7942818

[5] G. Carro, M. Carrasco, P. Plaza, M. A. Cañas, E. Sancristobal, M. Castro, et al., "Mechatronics and robotics as motivational tools in remote laboratories," 2015 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), Tallinn, 2015, pp. 118-123. DOI: 10.1109/EDUCON.2015.7095960.

[6] A. Araújo, D. Portugal, M. S. Couceiro and R. P. Rocha, "Integrating Arduino-based educational mobile robots in ROS," 2013 13th International Conference on Autonomous Robot Systems, Lisbon, 2013, pp. 1-6. DOI: 10.1109/Robotica.2013.6623520

[7] G. Carro, S. Martin, E. Sancristobal, F. Mur and M. Castro, "Robotics, the New Industrial Revolution," in IEEE Technology and Society Magazine, vol. 31, no. 2, pp. 51-58, Summer 2012. DOI: 10.1109/MTS.2012.2196595.

[8] C. A. Petry, F. S. Pacheco, D. Lohmann, G. A. Correa and P. Moura, "Project teaching beyond Physics: Integrating Arduino to the laboratory," 2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE), Seville, 2016, pp. 1-6. DOI: 10.1109/TAEE.2016.7528376

[9] P. Brox, G. Huertas-Sánchez, A. López-Angulo, M. Álvarez-Mora and I. Haya, "Design of sensory systems using the platform Arduino by undergraduate Physics students," 2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE), Seville, 2016, pp. 1-6. DOI: 10.1109/TAEE.2016.7528356

[10] P. Plaza, E. Sancristobal, G. Carro, M. Castro and C. Pérez, "Collaborative robotic educational tool based on programmable logic and Arduino," 2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE), Seville, 2016, pp. 1-8. DOI: 10.1109/TAEE.2016.7528380

[11] A. Vega, J. Cabrera, J. M. Cerezo and E. Vega, "Pocket-bus: A new strategy for embedded systems," 2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE), Seville, 2016, pp. 1-6. DOI: 10.1109/TAEE.2016.7528354

[12] Scratch [Online]. Disponible en: https://scratch.mit.edu/, visitado en 18 de febrero de 2018.

[13] P. Plaza, E. Sancristobal, G. Carro, M. Castro, M. Blazquez, J. Muñoz and M. Álvarez, " Scratch as educational tool to introduce Robotics," 2017 International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL), Budapest, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-73210-7_1

[14] Redfern electronics [Online]. Disponible en: http://redfernelectronics.co.uk/, visitado en 18 de febrero de 2018.

[15] P. Plaza, E. Sancristobal, G. Carro and M. Castro, "Home-made robotic education, a new way to explore," 2017 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), Athens, 2017, pp. 132-136. DOI: 10.1109/EDUCON.2017.7942837

[16] Arduino [Online]. Disponible en: https://www.arduino.cc/, visitado en 18 de febrero de 2018.

[17] P. Plaza, E. Sancristobal, G. Carro, M. Castro, M. Blazquez (2017) From 4 Wheeled Remote Robot to Serious Collaborative Remote Laboratory. Int Rob Auto J 3(4): 00065. DOI: 10.15406/iratj.2017.03.00065

[18] P. Plaza, E. Sancristobal, G. Carro and M. Castro, "A Wireless robotic educational platform approach," 2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), Madrid, Spain, 2016, pp. 145-152. DOI: 10.1109/REV.2016.7444455

[19] P. Plaza, E. Sancristobal, G. Carro and M. Castro, "Robotic Educational Tool to engage students on Engineering," 2016 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), Eire, PA, 2016, pp. 1-4. DOI: 10.1109/FIE.2016.7757417

Sinergia LEGO Mindstorms – Arduino: aprovechamiento de las ventajas de ambas plataformas

Emilio Fernández Moreno
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares (Madrid) - Spain
ernandezm@edu.uah.es

Julio Pastor-Mendoza
Departamento de Electrónica
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares (Madrid) - Spain
julio.pastor@uah.es

***Abstract*— Las plataformas más utilizadas en la enseñanza de la tecnología, programación y robótica en enseñanzas medias son LEGO Mindstorms y Arduino. Las plataformas robóticas de LEGO se caracterizan por su sencillez en la programación y en el montaje mecánico mientras que su principal inconveniente es el alto precio de los componentes. Los sensores y actuadores disponibles para Arduino son bastante económicos, pero son difíciles de integrar en una estructura mecánica multifuncional. El presente trabajo analiza las ventajas y desventajas del uso de las plataformas de LEGO Mindstorms y Arduino en la enseñanza y presenta dos alternativas para integrar ambos mundos aprovechando las ventajas de cada uno de ellos: en la primera, LEGO Mindstorms controla sensores y actuadores de índole comercial, llegando hasta mantener una comunicación maestro-esclavo con Arduino; en la segunda línea, Arduino se encarga de controlar los periféricos de LEGO Mindstorms.**

***Keywords*—LEGO Mindstorms, Arduino, sensores, actuadores, microcontrolador.**

I. INTRODUCCIÓN

LEGO Mindstorms es una plataforma robótica desarrollada por LEGO muy utilizada en enseñanza secundaria. Hasta la fecha han sido desarrolladas tres generaciones RCX, NXT y EV3. La introducción en el mercado de EV3 ha obligado a muchos centros educativos a realizar nuevas inversiones si quieren tener el software actualizado. Si bien la plataforma EV3 es más potente, tiene más precisión en los movimientos y funciones más avanzadas que su antecesora, el NXT resuelve con creces las necesidades de los centros formativos de enseñanza secundaria.

Por otro lado, en los centros educativos de todo el mundo se están introduciendo actividades con la plataforma Arduino, menos orientada a niños, pero con muchas ventajas ya que se pueden conseguir muy altas funcionalidades a precios bastante económicos. Por ejemplo, en la Comunidad de Madrid (España), desde hace 3 años hay una asignatura obligatoria para los estudiantes de enseñanza secundaria en 1º, 2º y 3º de ESO y optativa en 4º ESO denominada "Tecnología, Programación y Robótica" donde, dependiendo de los centros, utilizan tecnologías muy diversas.

La plataforma LEGO Mindstorms es también muy utilizada en estudios de Grado para introducir a los estudiantes en la programación en titulaciones relacionadas con la informática [1][2] o dentro de asignaturas de diseño en grados orientados al diseño industrial [3]. En otras universidades existen cursos de iniciación a la ingeniería donde estos robots se utilizan para trabajar de forma experimental con sistemas que posteriormente analizarán desde un punto de vista teórico [4][5][6].

Muchos centros educativos de secundaria y universitarios han hecho grandes inversiones en material de Lego Mindstorms NXT que ya no es mantenido por LEGO. Este proyecto pretende dar una solución a este problema proponiendo una sinergia entre LEGO Mindstorms NXT y Arduino, para lo que se muestra el diseño de dos prototipos completamente funcionales.

II. PLATAFORMAS UTILIZADAS

A. LEGO Mindstorms

La plataforma LEGO Mindstorms consiste en un controlador programable, motores, sensores y piezas de construcción diseñadas para ser acopladas entre sí. LEGO Mindstorms fue desarrollado como un juguete ambicioso por LEGO en 1998. Seymor Papert, que trabajó en el consejo asesor de LEGO durante muchos años, fue uno de los promotores de esta plataforma con el objetivo de que los niños aprendan jugando con la ayuda de la tecnología. Incluso la marca "Mindstorms" se deriva de su libro llamado "Mindstorms: Children, Computers and Powerful Ideas" [7]. El objetivo principal del proyecto LEGO Mindstorms fue crear un entorno de aprendizaje que permitiera "aprender haciendo". Papert introdujo esta frase pegadiza para representar la idea del construccionismo [8].

Hasta la fecha han sido desarrolladas tres generaciones de LEGO Mindstorms. En la Tabla 1 se muestran las principales características de cada una [9] [10].

Aunque la versión EV3 es la que actualmente está en el mercado, muchos centros educativos de enseñanza secundaria y universidades disponen de la versión NXT (controlador, motores y sensores) que es un material robusto y potente, que rivaliza con muchos de los microcontroladores que se pueden encontrar actualmente. Uno de los objetivos de este proyecto es

proporcionar grandes posibilidades de ampliación a esta plataforma.

TABLA I. COMPARACIÓN ENTRE LAS TRES GENERACIONES DE LEGO MINDSTORMS [11] [12] [13]

Generación	RCX (1ª)	NXT (2ª)	EV3 (3ª)
Procesador	Hitachi H8/3292	Atmel ARM7	Texas Instruments ARM9
Frecuencia de trabajo	16 Mhz	48 Mhz	300 Mhz
Memoria	16 Kb ROM 32 Kb RAM	256 Kb FLASH 64 Kb RAM	16 Mb FLASH 64 Mb RAM
Comunica-ciones	3 para motores 3 para sensores	3 para motores 4 para sensores	4 para motores 4 para sensores
			

B. *Arduino*

Arduino surgió en el año 2005, como un proyecto enfocado a los estudiantes del Interaction Design Institute Ivrea (IDII) en el norte de Italia [14] ante la necesidad que tenían los estudiantes y profesionales de diseño de disponer de una plataforma hardware fácil de programar y utilizar por personas que no tuvieran un perfil técnico, ya que las que había en el mercado eran de un coste elevado y con herramientas de programación que, además de no ser intuitivas, no eran multiplataforma.

Se trata de uno de los proyectos más exitosos de "open source hardware" (fuentes de hardware abiertas), donde tanto su software como su hardware son accesibles para que cualquier usuario pueda verlo y modificarlo si fuese necesario.

Dentro del mundo Arduino hay diversos modelos de tarjetas con características diferentes, tanto a nivel físico como a nivel de hardware. Las más utilizadas son Arduino UNO, Arduino Nano y Arduino Mini (Fig. 1).

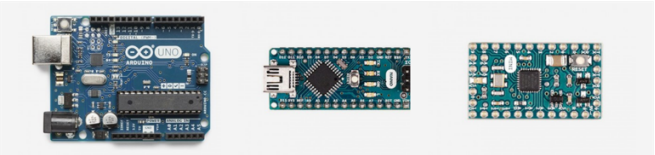


Fig 1. De izda. a dcha. tarjetas Arduino UNO, Arduino Nano y Arduino Mini [15]

Para la realización de este trabajo se ha elegido la tarjeta Arduino Nano debido a su reducido tamaño y a la simplicidad con la que se puede establecer la comunicación con el ordenador, ya que incluye un circuito integrado FT232RL adicional que tiene un interfaz USB.

A raíz del éxito de la plataforma Arduino, se han desarrollado innumerables sensores y actuadores de bajo coste pensados para ser conectados directamente a la tarjeta, con suficiente documentación y ejemplos de uso que ha convertido Arduino en una plataforma base para los aficionados del DIY ("*Do It Yourself*") con una ingente capacidad de ampliación con costes muy económicos.

III. ADAPTACIÓN DE AMBAS PLATAFORMAS

Mediante un estudio detallado de ambas plataformas se han podido evaluar las ventajas e inconvenientes que presentan cada una de ellas.

Una de las ventajas importantes de LEGO Mindstorms es la gran difusión que tiene en todo el mundo, lo que se traduce en una gran comunidad de usuarios trabajando con la plataforma y desarrollando complementos, especialmente software, como son diferentes lenguajes de programación gráficos y textuales. Algunas de las herramientas más utilizadas en el campo de la robótica como ROS (Robotics Operating System), Matlab o LabView tienen paquetes para utilizar las plataformas de Lego Mindstorms.

La mayor ventaja es sin duda la capacidad de relacionar la programación, con la electrónica (sensores y actuadores) y el diseño mecánico mediante piezas ensamblables y reutilizables. El diseño mecánico permite desarrollar competencias de visión espacial y creatividad, a la vez que facilita la transmisión de conocimientos físicos, mecánicos y de estructuras.

La simplicidad en la conexión de los sensores, de los motores y del sistema de control entre sí, es también un punto a favor de la plataforma de LEGO.

Uno de los mayores inconvenientes con que cuenta la plataforma LEGO Mindstorms, además de su elevado precio, es su limitado número de puertos de entrada destinados a la conexión de sensores, tanto digitales como analógicos. Esto, sumado a que LEGO no tiene una gran variedad de sensores y actuadores, hace que la plataforma en ocasiones se quede corta cuando se quieren realizar proyectos de cierta complejidad.

Por otro lado, la plataforma Arduino tiene como aspectos positivos fundamentales: su reducido precio de adquisición, tanto de las tarjetas de control como de la mayor parte de sensores y actuadores disponibles; la gran variedad de periféricos (sensores, actuadores, periféricos de comunicaciones, …) que se le pueden conectar; la gran cantidad de documentación disponible que hace muy sencillo trabajar con ella; y un alto número de entradas y salidas multifuncionales disponibles.

El mayor inconveniente de Arduino para su uso en robótica es su difícil integración con elementos hardware mecánicos por lo que la colocación de los sensores y actuadores en una estructura suele ser una tarea compleja y normalmente no reutilizable.

Analizando las ventajas e inconvenientes de las dos plataformas se evidencia que, uniendo las dos arquitecturas, se podría conseguir una sinergia que permitiera conseguir resultados mucho mejores que con las dos plataformas por separado. Esto es especialmente interesante cuando se intentan realizar proyectos de robótica relativamente complejos, donde se requiere un gran número y variedad de sensores y actuadores, y a la vez fuera interesante tener la posibilidad de realizar prototipos mecánicos con facilidad.

A continuación, ser presentan dos robots diseñados como prototipos de la integración LEGO Mindstorms – Arduino: un robot tiene como núcleo el controlador de LEGO Mindstorms NXT que está situado en una plataforma robótica convencional (no LEGO) y que utiliza sensores y actuadores comúnmente utilizados con Arduino; el otro robot tiene como núcleo de controla la tarjeta Arduino, y utiliza sensores y actuadores de LEGO Mindstorms estando a su vez integrado el controlador con la estructura mecánica de LEGO.

A. Robot A

Para el desarrollo de este robot se ha utilizado el ladrillo inteligente NXT (brick) como núcleo de control de sensores y actuadores que no son de LEGO y que se encuentran fácilmente por a bajo coste. También se ha añadido al sistema una tarjeta Arduino Nano, que se comunica con el controlador mediante un bus bajo la norma RS-485, permitiendo de esta manera ampliar las prestaciones que tiene el controlador NXT. En la Fig. 2 se puede ver el diagrama de bloques del sistema.

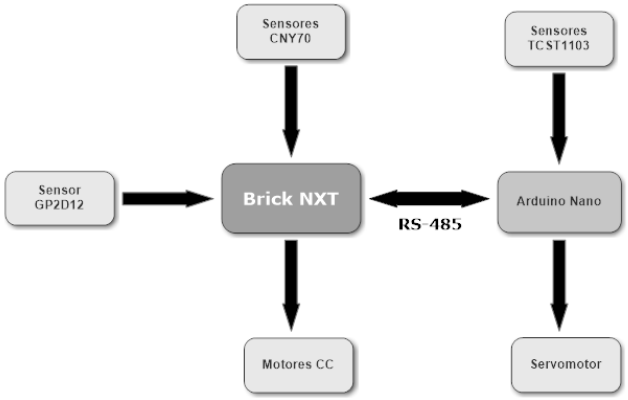


Fig 2. Diagrama de bloques del robot A

Los puertos de salida del controlador NXT contienen seis conexiones que pueden ser diferenciadas en tres secciones: control de motores, alimentación y sensores de rotación (Tabla II).

TABLA II. CONEXIONES PUERTO DE SALIDA BRICK NXT [16]

Pin	Nombre	Función	Color
1	MA0	Señal de salida PWM	Blanco
2	MA1	Señal de salida PWM	Negro
3	GND	Tierra	Rojo
4	POWERMA	+4.3V	Verde
5	TACHOx0	Señal de entrada encoder	Amarillo
6	TACHOx1	Señal de entrada encoder	Azul

Los puertos de entrada del brick (Tabla III) tienen seis conexiones que, al igual que los puertos de salida, se pueden diferenciar en tres secciones: señales analógicas, alimentación y señales digitales.

TABLA III. CONEXIONES PUERTOS DE ENTRADA BRICK NXT [16]

Pin	Nombre	Función	Color
1	ANA	Señal de entrada analógica, +9V	Blanco
2	GND	Tierra	Negro
3	GND	Tierra	Rojo
4	IPOWERA	+4.3V	Verde
5	DIGIxI0	Señal de reloj I^2C (SCL), RS-485 B	Amarillo
6	DIGIxI1	Señal de datos I^2C (SDA), RS-485 A	Azul

En el pin 1 de los puertos de entrada es importante destacar que hay una resistencia interna de pull-up de 10 KΩ, que va a influir a la hora de introducir valores analógicos en él (Fig. 3).

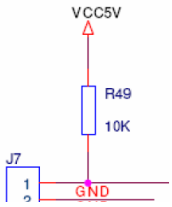


Fig 3. Entrada analógica puerto NXT

El controlador NXT dispone de una conexión RS-485 en los pines 5 y 6 del Puerto (Fig. 4). Esta norma, utiliza un bus de transmisión multipunto diferencial de dos hilos, es decir, la tensión diferencial entre los dos hilos define el nivel lógico que se va a enviar. El RS485 es ampliamente utilizado en la industria como elemento de comunicación entre controladores y sensores o actuadores, o entre controladores por lo que hay gran cantidad de dispositivos que podrían conectarse directamente al controlador por este puerto.

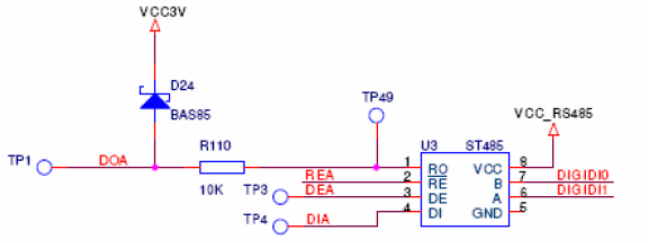


Fig 4. Circuito RS-485 brick NXT

Una vez analizado el brick NXT, se han elegido varios dispositivos electrónicos para conectarlos con él. En el apartado de sensores se han adaptado: dos sensores de infrarrojo reflexivos CNY70 cuyo cometido es permitir al robot visualizar líneas en el suelo; un sensor de distancia de infrarrojos GP2D12 para poder detectar obstáculos cercanos; y dos sensores de pulsos TCST1103 para poder evaluar el movimiento de los motores.

Los sensores analógicos tienen que conectarse al pin 1 de los puertos de entrada. Como los pines analógicos tienen una resistencia de pull-up conectada a ellos, ha sido necesario desarrollar una electrónica de acondicionamiento para que

pudiesen ser funcionales, y para facilitar su integración en el sistema, se han diseñado y fabricado varias placas de circuito impreso (PCB). En las Fig. 5, 6 y 7 se muestra el esquema de los circuitos diseñados y en la Fig. 8 los circuitos impresos.

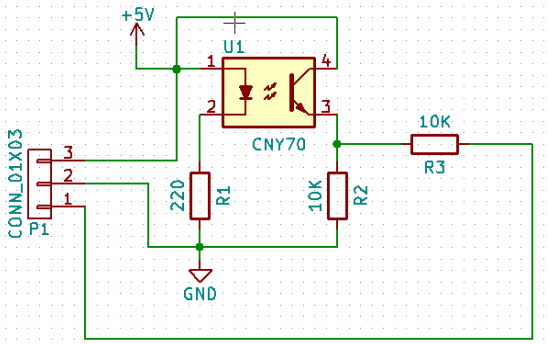


Fig. 5: Circuito adaptador CNY70

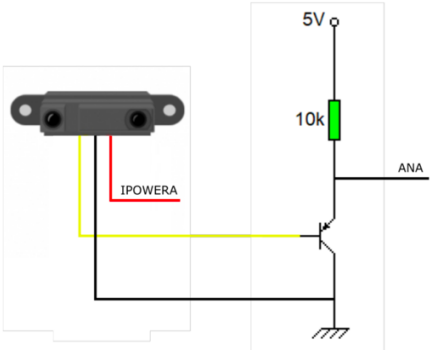


Fig. 6: Circuito adaptador GP2D12

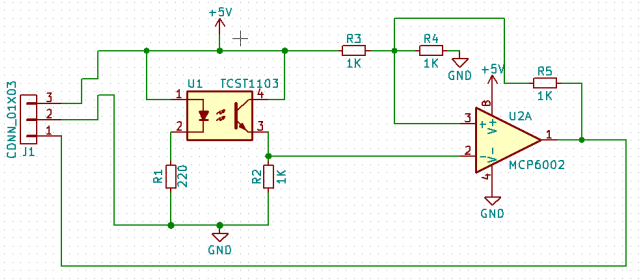


Fig. 7: Circuito adaptador TCST1103



Fig 8. PCB de adaptación de los sensores CNY70 y TCST1103 diseñados

En cuanto a los motores utilizados, se tratan de motores de corriente continua con reductora que sirve para reducir la velocidad del motor y aumentar el par.

El robot en total utiliza cinco sensores y el brick sólo tiene 4 puertos de entrada, por lo que se ha hecho uso del puerto de comunicaciones a alta velocidad para conectar en él una tarjeta Arduino Nano, y así ampliar el número de puertos de entrada (Fig.9). Se ha diseñado una PCB que integra la tarjeta y el driver que permite una comunicación mediante el bus RS-485.

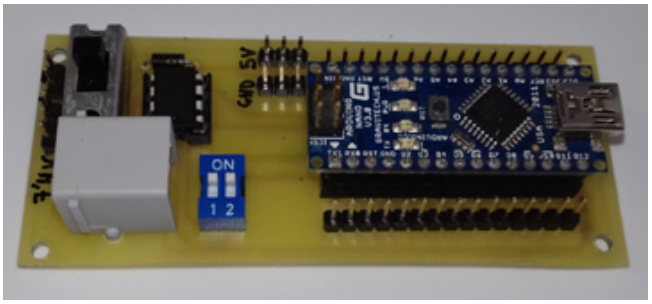


Fig. 9 Interfaz comunicación NXT – Arduino

Debido a que se ha utilizado el puerto de entrada número 4 para establecer una comunicación con la tarjeta Arduino Nano, solo quedan disponibless tres puertos de entrada del brick. En esos tres puertos van a ir conectados los tres sensores reflexivos, todos ellos analógicos, mientras que los sensores de transmisión van conectados a la tarjeta Arduino.

Esta decisión se ha tomado así, ya que los sensores de transmisión forman parte del encoder de los motores y es necesario utilizar interrupciones externas para tener medidas más precisas.

Los encoder también cuentan con dos discos codificadores, diseñados mediante impresión 3D, que permitirán al robot tener un control preciso de la velocidad de giro. En la Fig. 10 se pueden ver el motor con reductora y el encoder.

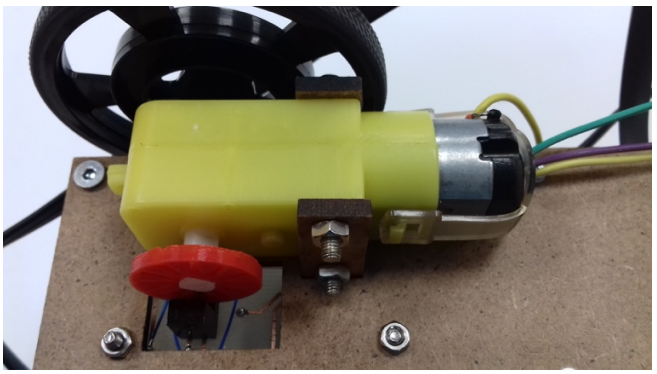


Fig 10. Motor de corriente continua y Encoder del robot

El chasis se diseñó con DM (densidad media), cortado mediante la técnica del corte por láser y estructurado en dos plantas para que pueda ser más compacto, lo podemos ver en la Fig. 11.

A la configuración básica se le ha añadido un mando de la videoconsola Wii, conocido como Nunchuck. Este mando es útil debido a que contiene dos botones, un joystick bidireccional y un acelerómetro de tres ejes. Además se

comunica mediante un bus I2C, muy sencillo de utilizar. También se conectó a la tarjeta Arduino un servomotor de aeromodelismo que era controlado también desde el NXT a través del RS485.

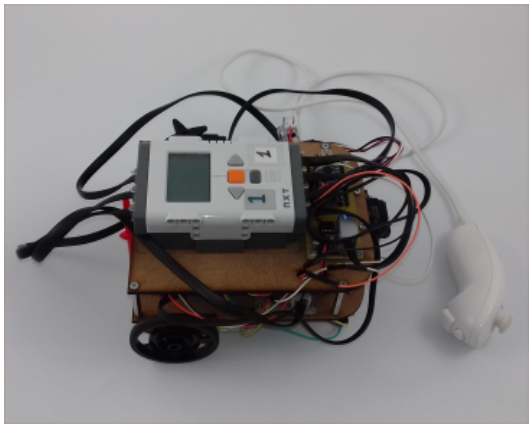


Fig 11. Apariencia externa del Robot A

Junto con el diseño de las tarjetas adaptadoras y el montaje del robot, se realizó un programa para el NXT en lenguaje NXC y se programó la tarjeta Arduino dándole una funcionalidad completa al robot.

B. Robot B

El segundo robot tiene como núcleo de procesamiento una la tarjeta Arduino Nano, que se conecta a los sensores y actuadores del kit LEGO Mindstorms NXT. En la Fig. 12 se puede ver el diagrama de bloques del sistema de prueba construido.

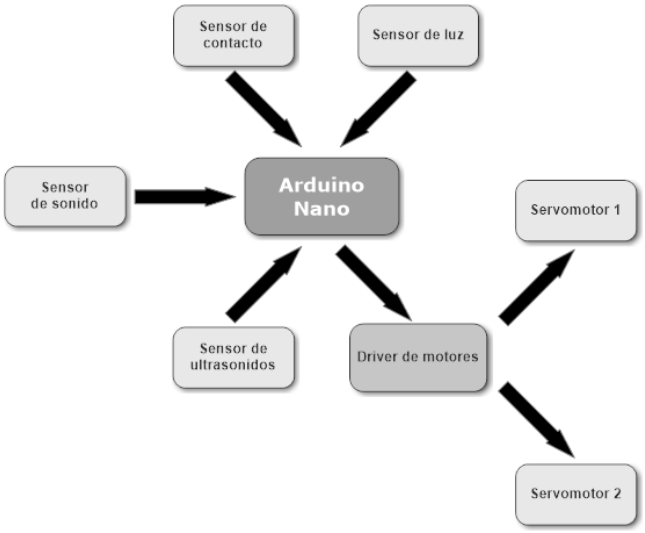


Fig 12. Diagrama de bloques del Robot B

El primer inconveniente que aparece es la dificultad que existe para conectar los periféricos de LEGO con una tarjeta Arduino. Por esta razón se diseñó una tarjeta (Fig. 13) donde estaba integrado el controlador con un Puente en H para poder controlar dos motores de corriente continua y seis conectores RJ12 (similares a los utilizados en el NXT). En este robot se utilizan los sensores de contacto, sonido, luz y ultrasonidos del kit, además de dos motores.

El puente en H utilizado es el DRV8835 de doble canal capaz de manejar corrientes de hasta 1.2 A por cada motor, más que suficiente para los motores de LEGO Mindstorms.

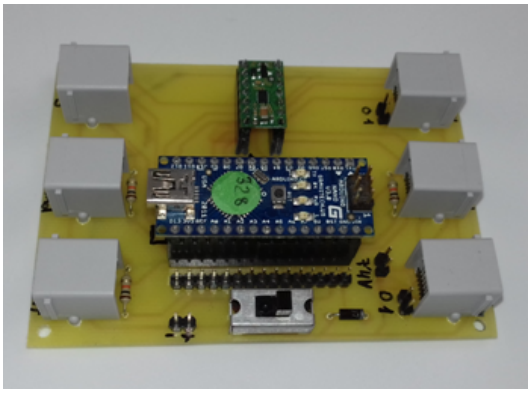


Fig 13. PCB sistema embebido

Una vez creada la tarjeta de control, se diseñó un recubrimiento estructural de la tarjeta que dispone de agujeros compatibles con las piezas de Lego Technic que utiliza Lego Mindstorms NXT y que fue impreso en una impresora 3D. La tarjeta de control con su recubrimiento estructural se completó con piezas de LEGO (Fig 14) formando un robot con un núcleo de control de Arduino programable en C++ (o en cualquier otro entorno de programación compatible).

El diseño hardware se completó con un conjunto de funciones que permitían leer de los sensores y actuar en los motores.

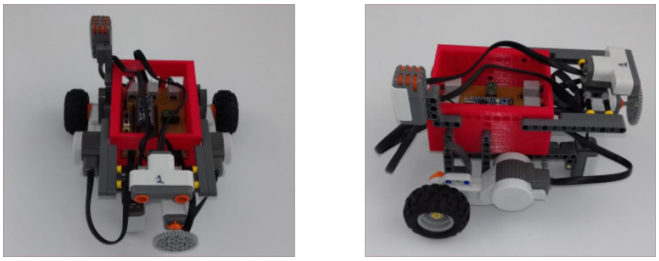


Fig 14. Vista frontal y laterial del Robot B donde se observa el recubrimiento estrucutral de la tarjeta de control impreso en 3D

IV. Conclusiones

A la vista de los prototipos diseñados, montados y probados controlando sensores y actuadores de LEGO desde Arduino y viceversa, junto de la adaptación mecánica para unir la tarjeta de Arduino a un diseño de Lego Technic, se puede decir que se ha conseguido la integración exitosa entre ambas plataformas y que esta integración puede utilizarse fácilmente para diseñar robots mucho más complejos que los montajes estándar de LEGO Mindstorms NXT.

Además, a lo largo de la realización del trabajo se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- La tecnología del brick NXT, a pesar de ser del 2006, no está obsoleta y puede competir todavía con mucha de la que existe actualmente en el mercado.
- Arduino es una plataforma que está en constante crecimiento.
- El kit LEGO Mindstorms es compatible con otros dispositivos que pueden hacer de él una plataforma más potente.
- Arduino y LEGO Mindstorms son dos plataformas que pueden acercar a la gente a la robótica de una forma fácil y sencilla.
- Las técnicas de corte por láser e impresión 3D son muy útiles en robótica.
- La aparición de plataformas *open source* han potenciado el desarrollo de la robótica entre la población.

REFERENCIAS

[1] Klassner, Frank, and Scott D. Anderson. "Lego MindStorms: Not just for K-12 anymore." IEEE Robotics & Automation Magazine 10.2 (2003): 12-18.

[2] Williams, Andrew B. "The qualitative impact of using LEGO MINDSTORMS robots to teach computer engineering." IEEE Transactions on Education 46.1 (2003): 206.

[3] Langer, Constanze, and Christine Strothotte. "The benefits of integrating LEGO mindstorms into design education: Course" Media Systems"." DS 43: Proceedings of E&PDE 2007, the 9th International Conference on Engineering and Product Design Education, University of Northumbria, Newcastle, UK, 13.-14.09. 2007. 2007.

[4] Pastor Mendoza, Julio; Revenga de Toro, Pedro A.; "Aprendizaje basado en proyectos en una asignatura transversal de robótica móvil". Actas del XI Congreso TAEE (Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica), , Bilbao, 2014.

[5] Straub, Jeremy, Scott Kerlin, and Eunjin Kim. "Analysis of Student Characteristics and Feeling of Efficacy in a First Undergraduate Artificial Intelligence Course." Submitted to the Journal of Educational Computing Research (2017).

[6] Gonçalves, Rogério Sales. "Application of LEGO Mindstorms Kits for Teaching Mechatronics Engineering." International Journal for Innovation Education and Research 5.10 (2017): 99-113.

[7] Papert, S.: Mindstorms: Children, Computers, and Powerful Ideas. (Perseus Books, 1999).

[8] Papert, S. and Harel, I.: Constructionism (Ablex Publishing Corporation, 1991).

[9] M. Pablo Turmero (2015), "Lego Mindstorms - Monografias.com", Monografias.com. [Online]. Disponible:
http://www.monografias.com/trabajos105/lego-mindstorms/lego-mindstorms.shtml

[10] "Comparativa Mindstorms NXT vs. EV3-electricBricks", Blog.electricbricks.com, 2014. [Online]. Disponible:
http://blog.electricbricks.com/2014/07/comparativa-mindstorms-nxt-ev3/

[11] "CSC 126 Lab #13", Faculty.berea.edu. [Online]. Disponible:
https://faculty.berea.edu/faculty/pearcej/CSC126/bottasks/L13-NXT-prog.html

[12] L. 9841, "LEGO NXT Intelligent Brick Set 9841 | Brick Owl - LEGO Marketplace", Brickowl.com, 2015. [Online]. Disponible:
http://www.brickowl.com/catalog/lego-nxt-intelligent-brick-set-9841

[13] "LEGO® MINDSTORMS® EV3", Robotshop.com, 2016. [Online]. Disponible:
http://www.robotshop.com/ca/en/lego-mindstorms-ev3-us.html

[14] Kushner, David. "The making of arduino." IEEE Spectrum 26 (2011)

[15] "Arduino - Home", Arduino.cc, 2015. [Online]. Disponible:
https://www.arduino.cc/

[16] "LEGO NXT wire pinout", Salvius the Robot, 2012. [Online]. Disponible:
https://blog.salvius.org/2012/04/lego-nxt-wire-pinout.html

ÍNDICE DE AUTORES

Aciego, Juan José 183
Acón, Andrea 569, 576
Aguilar Peña, Juan Domingo 167, 309, 529
Aguilera Jiménez, David 494
Alejos, Ana 33
Álvarez Jiménez, David 529
Alves, Gustavo 56, 66, 131, 283, 289
Angulo, Ignacio 597
Añorga Benito, Javier 111
Arco, José Manuel 520
Arrizabalaga Juaristi, Saioa 111
Artal Sevil, Jesús Sergio 73, 81, 569, 576
Asensio Nieto, Alejandro 500
Ayala Alfonso, Alejandro J. 603
Azpilicueta, Leyre 33

Baena Oliva, Carmen 587, 593
Baizán Álvarez, Pablo 299
Barba Magdalena, Sofía 214
Barrero García, Federico J. 121, 126, 412, 418
Batanero, María Concepción 520
Bellido-Outeiriño, Francisco J. 37
Belzarena García, Pablo 104
Benítez, José M. 43
Berenguer, Roc 27
Berian, Andoni 27
Bernal Agustín, José L. 73
Bernal Ruiz, Carlos 81
Bernal Tristancho, Víctor Hugo 325, 332
Bidarte, Unai 254, 262, 427
Blanco Bascuas, Teresa 430, 438
Blázquez, Manuel 197, 299, 617
Bona, Daniel 283
Bono Nuez, Antonio 548
Bragós, Ramón 446
Brox Jiménez, María 399, 406

Cáceres, Manuel 512
Caeiro Rodríguez, Manuel 454
Carias, Juan Francisco 111
Carro, Germán 197, 617
Casas Nebra, Roberto 430, 438
Castro Gil, Manuel 43, 121, 197, 299, 617
Castro Santiago, Mario 472
Charosky, Guido 446
Cintas Cintas, Daniel 167
Concari, Sonia 289
Cortés Llanos, Alexander 325, 332
Coscia, Héctor 289
Costa, Ricardo 56, 66, 520
Costas, Roberto 520
Crepaldo, Daniel 289
Cruz, Eneko 597
Cuadrado, Carlos 254, 262, 427
das Chagas Mota, Francisco 98
Daza Márquez, Alberto 205, 363
de Andrés, Ana 520
de la Casa Higueras, Juan 512
del Colle, Franco 289
del Río, David 27
Díaz Cabrera, Moisés 355
Díaz Rodríguez, Alberto 609
Díez Orueta, Gabriel 299
Domínguez Navarro, José Antonio 569, 576
Dufo López, Rodolfo 73

Durán, Álvaro 189
Durán, Mario 183, 189

Eliche Quesada, Dolores 529
Ernesto Real, Gustavo 340
Escudero Hernanz, María Soledad 520

Fabiani Bendicho, Peña 152, 223
Falcone, Francisco 33
Felgueiras, Manuel Carlos 56, 66
Fernández Carrasco, Juan Ignacio 167, 536
Fernández Moreno, Emilio 624
Fernández Ramos, Raquel 161, 205, 363
Fernández Solas, Álvaro 536
Fernández, Ángela 189
Fernández, Eduardo F. 512
Ferreira, Golberi 283
Ferrer Ballester, Miguel Ángel 355
Fidalgo, André 66, 131
Figueroa Lorenzo, Santiago 111
Firman, Andrés 512
Florencia Jauré, María 340
Flores Román, Jorge Antonio 380
Flores-Arias, José M. 37
Fortet, Pedro 270
Fuentes Conde, Manuel 137, 144

Gallardo Caballero, Ramón 380, 500
Gañán, Fabio 418
García Entrambasaguas, Paula 183
García Loro, Félix 131, 197, 299, 617
García Manso, Antonio 380, 500
García Orellana, Carlos J. 380, 500
García Zubia, Javier 131, 289, 597
García, Carla 131
García, Cristhian 465
Garrido Sánchez, Pablo 51, 494
Gersnoviez Milla, Andrés A. 399, 406
Ghorghor, Javier 289
Gil de Castro, Aurora 317
Giusto, Álvaro 239
Gómez Estern, Fabio 348
Gómez, Hilario 520
González Barbone, Víctor 104
González Hernández, Oswaldo B. 603
González Pérez, Sara 152, 223
González Prieto, Ignacio 183, 189, 418
González Rodríguez, Ricardo Miguel 508
González Vega, Jesús Artemio 508
González Velasco, Horacio M. 380, 500
González, Ángel 183, 189
Guaita, Carlos 176
Guoliang, Yang 556
Gutiérrez Moreno, Rodrigo 214
Gutiérrez Reina, Daniel 275, 348

Hassi, Lotta 446
Hernández Aceituno, Javier 561
Hernández Jayo, Unai 131, 289, 597
Hernández, Mariló 270
Hernantes Apezetxea, Josune 111
Herruzo Gómez, Ezequiel 399
Hidalgo López, José Antonio 161
Hormigo Aguilar, Francisco Javier 230

Igual Catalán, Raúl 542, 548

Jaramillo Alcázar, Ángel 176
Jiménez Castillo, Gabino 309, 536
Jiménez Fernández, Carlos J. 587, 593
Jiménez Verde, Jaime 254, 262, 427
Juan Chico, Jorge 270

Kreiter, Christian 131

Lafuente, Sergio 520
Larroca, Federico 104
Lázaro, Jesús 254, 262, 427
León, Daniel 289
Lerro, Federico 289
Leveratto, Luciana 446
López Pérez, José María 430, 438
López Torralba, Juan Manuel 479
López, Enrique 412
Luján Mora, Sergio 176
Lujano Rojas, Juan M. 81
Luna, Tania 98

Machado Toledo, Javier 223
Macho Aroca, Alejandro 299
Macías Macías, Miguel 380, 500
Macías, Javier 520
Magdaleno Castelló, Eduardo 465
Mampaso, Antonio 609
Manchado Pérez, Eduardo 430
Marchisio, Susana 289
Marcos Aceved, Jorge 391
Marques, Arcelina 131
Martín Canales, José Francisco 161
Martín del Brío, Bonifacio 548
Martín Gutiérrez, Jorge 223
Martín Vázquez, Manuel Jesús 161
Martín, Cristina 418
Martín, Ernesto 520
Martínez Durillo, José Carlos 484
Martos Ramos, Francisco Javier 161
Matabuena, David 37, 317
Medina Gracia, Ricardo 317
Medrano Sánchez, Carlos 542, 548
Menacho, Antonio 43
Merendino, Claudio 289
Montañés Romero, José Luis 569, 576
Montes Romero, Jesús 512
Montijano Vizcaíno, Miguel Ángel 399, 406
Mora Luis, Carlos Efrén 152, 223
Moreno García, Isabel 317
Moreno Moreno, Carlos Diego 399, 406
Moreno Muñoz, Antonio 317
Moreu Falcón, Pilar 484
Muñoz Rodríguez, Francisco José 309, 536
Muñoz, Fernando 412
Muñoz, Javier 197

Navas González, Rafael 205, 363, 370

Oballe Peinado, Óscar 363
Olmo, Alberto 387
Orduña, Pablo

Pallarés López, Victor 317
Papageorgiou, Kyriaki 446
Parra Fernández, Pilar 587, 593
Parras, Luis 189
Pastor Mendoza, Julio 214, 624
Peña Hita, María de los Ángeles 309
Perales Esteve, Manuel A. 121, 126, 275, 412, 418
Pereira González, Emiliano 214
Pérez García, Pablo 387
Pérez, Clara 43
Pérez, Fernando 465
Pester, Andreas 131
Plano, Miguel 289
Plaza García, Inmaculada 542, 548
Plaza Merino, Pedro 617
Portela, Paulo 56
Potestad Ordóñez, Francisco E. 587, 593

Quintana Hernández, José Juan 355
Quintáns Graña, Camilo 391

Ramos, Juan José 446
Rico Riveros, Luis Fernando 325, 332
Ríos Gómez, Francisco Javier 161
Ríos Muñoz, Mario 214
Ríos, Natalia 183
Roca Piera, Javier 247
Rodríguez Gil, Luis 597
Rodríguez Linares, Nicolás Adrián 609
Rodríguez Martín, Gonzalo 214
Rodríguez Mendoza, Beatriz 603
Rodríguez Pérez, Silvestre 603
Rodríguez Valido, Manuel J. 465, 603
Rodríguez, Álvaro 348
Rodríguez, Andrés 230
Roldán Aranda, Andrés 51, 93, 472, 479, 484, 494
Romero Piqueras, Carlos 430
Romero Sánchez, Jorge 161
Ros, Germán 520
Rosero Beltrán, Jorge Luis 176
Rubia García, María Dolores 529
Ruiz de Clavijo Vázquez, Paulino 270
Ruiz, Antonio 418
Rumin, Luciano 289
Rus Casas, Catalina 309

Sainz, Esther 542
San Cristóbal Ruiz, Elio 617
Sánchez Berriel, Isabel 561
Sánchez Velasco, Luis 93
Sanz Gorrachategui, Iván 81
Saz, Isabel 542
Schaarschmidt, Toni 247
Schlichting, Luis C. M. 283
Serrano, Ana 542
Sivianes, Francisco 270
Solar Ruiz, Héctor 27
Sotomayor Basilio, Borja 597
Suárez-Pumariega, Ramiro Iglesias 391
Sújar Rodríguez, Juan A. 406

Toral Marín, Sergio 121, 126, 275
Torres Rodríguez, Iván Jesús 609
Tradacete Ágreda, Miguel 214

Ubé, Mariano 542
Ursutiu, Doru 131
Valencia, Manuel 587, 593
Valtonen, Kati 131
Vera, Luis H. 512

Viegas, Clara	56
Vitali, Amado Osvaldo	340
Vivar García, Marta	137, 144
Ying, Xiao	556
Yuepeng, Wang	556
Yúfera, Alberto	387
Zuloaga Izaguirre, Aitzol	254, 262, 427


Universidad
de La Laguna


TAEE
ASOCIACIÓN TECNOLOGÍA, APRENDIZAJE Y ENSEÑANZA DE LA ELECTRÓNICA


IEEE


EXCMO. AYUNTAMIENTO DE
SAN CRISTÓBAL DE
LA LAGUNA
PATRIMONIO DE LA HUMANIDAD




Puerto de la Cruz
parte de ti


COIITF
Ingenieros Industriales • Santa Cruz de Tenerife


ignos


metrotenerife


Pearson


XILINX