

# Aprendizaje Práctico de Sistemas Electrónicos Digitales a través de Proyectos Semiguidados

Camilo Quintáns, José Fariña, *Member, IEEE*, y Juan J. Rodríguez-Andina, *Senior Member, IEEE*

**Title—Hands-on Learning of Digital Systems through Semi-Guided Projects**

**Abstract—**This article presents the application of Project-Based Learning to the course “Digital Electronic Systems”, taught in the fourth year of the Industrial Electronics and Automation Engineering Degree (B.Eng.) at Universidad de Vigo, Spain. The lab assignments and the working methodology are based on two semi-guided projects developed through an incremental process, in which the target systems are progressively provided with additional functionalities. To do that, students must combine predefined circuits with others designed by them, until a final prototype is obtained. To address timing and materials constraints, students are provided at the beginning of the course with all required hardware components, as well as with detailed information regarding the tasks to be performed before, during and after each of the laboratory sessions. Tasks evolve from fully guided to mostly autonomous ones. Assessment results are also presented and discussed.

**Index Terms—**Digital circuits, Digital systems, Electronics engineering education, Field Programmable Gate Arrays, Microcontrollers, Project-based learning.

## I. INTRODUCCIÓN

ESTE artículo es una versión mejorada del presentado en ETAAE 2016 [1], sobre la aplicación de PBL (*Project Based Learning*) [2]-[4] a las prácticas de la asignatura Sistemas Electrónicos Digitales (SED) en la Universidad de Vigo. En esta versión se ha mejorado la contextualización del trabajo y la descripción de la metodología, y se han ampliado los resultados con los del curso 16/17.

La asignatura de SED se sitúa en cuarto curso del Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática, y es continuación de la asignatura Electrónica Digital y Microcontroladores de tercer curso. En la parte práctica de SED se realizan dos proyectos semiguidados: un regulador de velocidad angular basado en  $\mu\text{C}$  (microcontrolador), y un sistema de procesamiento digital en tiempo real basado en FPGA (*Field Programmable Gate Array*).

La principal contribución del trabajo es la adecuación de las actividades de SED para que se alcancen los objetivos de aprendizaje con una baja presencialidad de laboratorio. Los aspectos más importantes tenidos en cuenta son:

- Aprovechar las ventajas de la metodología PBL y la orientación multidisciplinar para aprender contenidos de electrónica aplicados al control de procesos.
- La disponibilidad de recursos materiales y de tiempo.
- El tamaño de los grupos de laboratorio, el reparto de horas entre sesiones teóricas y prácticas, y la coordinación entre ellas.
- El grado en que debe ser guiado el trabajo del alumno y el grado en que los recursos utilizados deben ser facilitados por el docente o desarrollados por el alumno.
- El reparto de tareas a realizar de forma presencial en el laboratorio o de forma autónoma por el alumno.
- La definición de las especificaciones, y la planificación y secuenciación de los objetivos y las tareas.
- El método de la evaluación, que debe ser tanto sumativa como formativa, para seguir el progreso del alumno.
- La opinión de los alumnos, para evaluar el plan de prácticas.

### A. Contexto del Plan de Prácticas de SED

Como asignatura terminal, SED tiene por objetivo completar las competencias y habilidades del alumno para el diseño, análisis, simulación, depuración, prueba y mantenimiento de sistemas basados en  $\mu\text{C}$  y dispositivos reconfigurables (FPGAs).

Como objetivos generales de la titulación relacionados con SED se destaca la formación de profesionales de perfil técnico con conocimientos globales de la rama industrial y de la tecnología específica de Electrónica Industrial y Automática, con capacidad para liderar el desarrollo de proyectos y capacidad de adaptación. Además, el titulado debe poder aplicar sus conocimientos al diseño, desarrollo y mantenimiento de circuitos electrónicos y sistemas automáticos en procesos y productos industriales, y, además, en otros ámbitos no industriales.

Los principales contenidos que se estudian son [5], [6]: los periféricos de comunicación serie y de captura y comparación; los modos de funcionamiento de bajo consumo; los formatos numéricos y operadores matemáticos; las FPGAs y los lenguajes de descripción de hardware (HDLs); y aplicaciones para el control industrial.

Los principales resultados de aprendizaje son:

- Dominar los recursos especializados de un  $\mu\text{C}$  para tareas de control de procesos.
- Adquirir habilidades para el modelado y síntesis de circuitos electrónicos digitales con HDLs.
- Dominar las técnicas de implementación de sistemas digitales complejos con FPGAs.

El peso que tiene la asignatura en el currículo es de 5 créditos ECTS (*European Credit Transfer and Accumulation System*), de los cuales un total de 18 horas corresponden a la docencia práctica presencial (horas de laboratorio) y 32,5 horas a clases magistrales. Las prácticas se distribuyen en 9 sesiones de 2 horas (5 para el Proyecto #1 y 4 para el #2).

### B. La Metodología de las Prácticas de SED

El aprendizaje basado en proyectos o PBL es un caso particular del método basado en problemas, más adecuado para la enseñanza de la técnica. Se produce como resultado del esfuerzo que hacen los alumnos para desarrollar un proyecto en grupos con la guía del profesor [7]. Este método combina temas de distintas disciplinas y tiene una realización física. Se basa en el dicho de que “aprender de verdad se aprende haciendo”.

Por ello, en SED los alumnos se organizan en grupos de dos, y deben trabajar cooperativamente para alcanzar los objetivos [8]. Aprenden estrategias para resolver problemas reales a partir de los recursos disponibles: componentes hardware y software, que debe estudiar (hojas de datos y subrutinas de programa ya probadas), y herramientas de test y medida: osciloscopio, sonda lógica y AL (analizador lógico).

Los proyectos se denominan semiguidados porque el grado en que se guía al alumno en su trabajo se ha situado en un punto intermedio entre unas actividades totalmente controladas (estructuradas) y unas libres (abiertas) [9].

En las prácticas controladas, el alumno sigue de forma “automática” una guía con un proceso preestablecido, donde las dificultades y sus soluciones son predecibles. En las prácticas libres, menos formales, sólo se marcan objetivos, se establecen especificaciones y se delimitan recursos [10].

Los proyectos semiguidados responden a la idea de que en ingeniería es necesaria cierta rigidez para que los alumnos desarrollen capacidad de adaptación y, al mismo tiempo, cierta libertad para que desarrollen capacidad de innovación.

Otro aspecto importante es delimitar qué trabajo debe ser realizado totalmente por el alumno y cuál facilitado por el profesor. Para ello, es muy importante tener en cuenta la distribución de las tareas de cada práctica en los proyectos. Estas tareas constituyen un conjunto de actividades posibilitadoras o capacitadoras, ya que están integradas dentro de una unidad (práctica) del programa y se enfocan como fases preparatorias de la tarea final (el prototipo acabado).

Las tareas son de tres tipos: previas (de preparación de las prácticas), a realizar en el laboratorio y posteriores. Este reparto tiene que ver con el seguimiento del profesor, en el que se debe integrar la evaluación formativa, que influye en la calificación, además de servir para que el alumno aprenda de sus errores. Para ello, el profesor debe proporcionarle una retroalimentación.

En las metodologías PBL el sistema físico suele estar constituido por kits de desarrollo para soldar los componentes sobre una PCB [11], por una sola placa con todos los componentes ya instalados [12], o por una de estas placas combinada con otra de prototipos donde los alumnos prueban sus propios diseños [13].

La solución adoptada en las prácticas de SED combina el uso de placas de desarrollo comerciales con una placa de prototipos, en la que se insertan tanto componentes electrónicos como mecánicos. Para facilitar el trabajo autónomo de los alumnos y mejorar su autogestión, al inicio de cada proyecto se proporciona a cada grupo a modo de *kit* de desarrollo todo el material necesario, que queda a su disposición para poder avanzar sin restricciones de horario.

El objetivo global es que el alumno aprenda a realizar sistemas complejos utilizando módulos hardware y/o software ya probados, que debe combinar con otros que él mismo desarrolle. Para seguir esta metodología es importante utilizar un proceso de desarrollo incremental del proyecto, basado en componentes. Así, el alumno debe entender las especificaciones generales y las de cada componente, tanto si lo debe desarrollar como si lo va a reutilizar. Se trata de que comprenda tanto el funcionamiento interno de los módulos como su interfaz y especificaciones. Por ejemplo, en el caso de los módulos de programa facilitados, si se proporciona el código, se evalúa la realización del diagrama de flujo correspondiente. Y, si se pretende reforzar el conocimiento del lenguaje de programación, se facilita el diagrama de flujo y se evalúa su codificación.

El resto del artículo se estructura como sigue. Los dos proyectos del programa de prácticas de SED se describen en los apartados II y III, respectivamente. En el apartado IV se analizan los resultados de las valoraciones de los alumnos. Finalmente, en el apartado V se resumen las conclusiones.

## II. PROYECTO #1: IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL DE LA VELOCIDAD DE UN MOTOR DE CC BASADO EN $\mu$ C

En este proyecto se estudian los periféricos del  $\mu$ C utilizados para la realización de un regulador de velocidad de un motor de cc. En la Fig. 1 se muestra el hardware, que consta de una placa de prototipos y de una placa 44-Pin *Demo Board* (en adelante placa PICKit3) de Microchip, junto con el programador PICKit3 del mismo fabricante.

Los componentes principales en la placa de prototipos son (Fig. 2):

- Visualizador LCD alfanumérico modelo NHD-C0220BiZ, con bus I2C (*Inter-Integrated Circuit*).
- Condensadores de filtro para las alimentaciones.

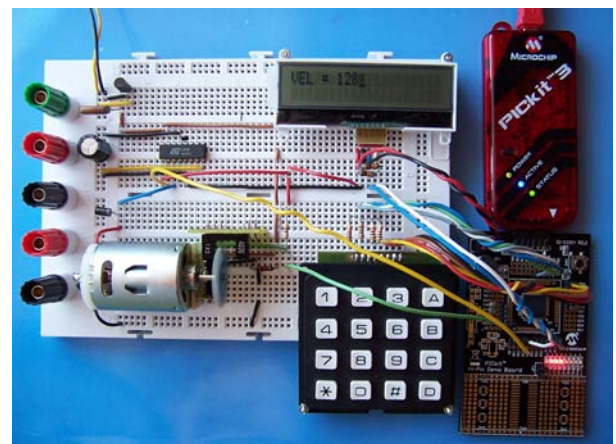


Fig. 1. Disposición de los componentes hardware del Proyecto #1

- Teclado matricial de 16 teclas modelo TC1440.
- Motor de cc de 12 V modelo RE-385, con diodos de libre circulación.
- Amplificador L293, para adaptar la salida PWM del  $\mu\text{C}$  al rango de corriente requerido por el motor.
- Sensor de velocidad optoelectrónico SX4070.
- Regulador lineal de tres terminales 78L05, para alimentar el amplificador y el sensor de velocidad.

Por su parte, los componentes en la placa PICKit3 son:

- Microcontrolador PIC18F45k20.
- Barra de 8 LEDs, utilizados para visualizar variables de 8 bits como, por ejemplo, velocidad del motor, consigna, etc.
- Resistencia ajustable, para generar la consigna.
- Pulsador, para generar eventos de control externos.
- Las especificaciones generales de funcionamiento son:
- El motor debe girar en un solo sentido y se alimenta con un regulador PWM.
- Las variables del programa se codifican con 8 bits.
- La consigna de velocidad la marca la posición del potenciómetro que está en la placa PICKit3.
- La velocidad y el estado (en marcha / parado) se deben mostrar en el visualizador.
- El controlador debe ser del tipo PI y la acción se debe saturar a 0 o 255.
- El tiempo de ciclo de programa del regulador debe ser de 0.5 s y coincidir con el periodo de muestreo del ADC del  $\mu\text{C}$  y con el tiempo de conteo de los pulsos del sensor de velocidad.
- En la versión final se debe utilizar el teclado para introducir las órdenes de marcha y de paro. Al conectar la alimentación, el sistema debe estar en el estado “parado” hasta que se pulse la tecla \*. Si se pulsa la tecla #, se debe dejar de actuar sobre el motor y pasar al estado “parado”.
- En las pruebas finales se debe provocar una perturbación variando la tensión de alimentación VCC2 (Fig. 2) para comprobar cómo varía la actuación para corregir el error.

En la guía de cada práctica se proporciona toda la información necesaria para que el alumno avance de forma más o menos controlada. Se indican las tareas previas, las presenciales y las posteriores. Las tareas comienzan con un alto grado de guiado y terminan con un alto grado de libertad. Como mínimo, en las tareas posteriores los alumnos deben contestar a las cuestiones planteadas y realizar el diagrama de flujo de los módulos de código que se les proporcionan.

En cuanto a los objetivos de aprendizaje, los dos siguientes son comunes a todas las prácticas del Proyecto #1:

- Saber interpretar esquemas electrónicos y tener capacidad para montarlos físicamente en una placa de prototipos.
- Saber documentar programas mediante diagramas de flujo y comentarios en línea.

A continuación se describen las distintas prácticas en las que se estructura el Proyecto #1.

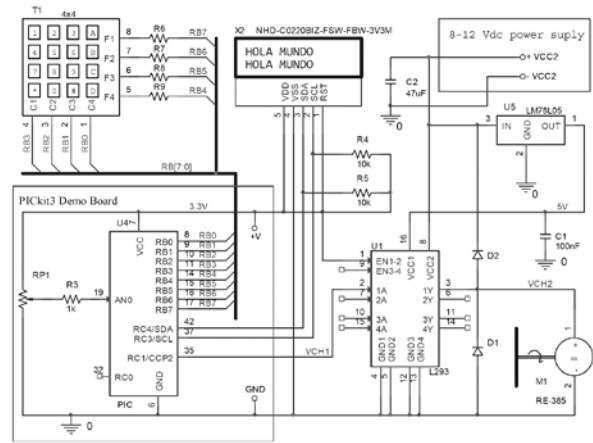


Fig. 2. Esquema eléctrico del Proyecto #1 facilitado a los alumnos.

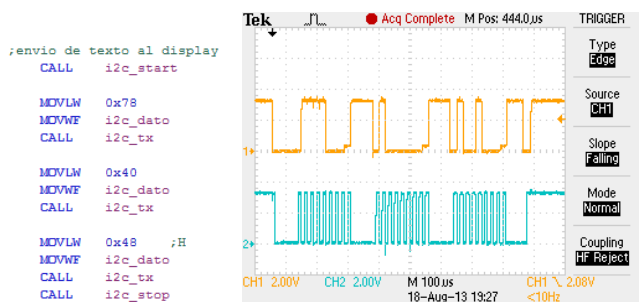
### A. Práctica 1: Comunicación Serie con el $\mu\text{C}$ . Conexión de un Visualizador a través del Bus I2C.

Los objetivos específicos de aprendizaje son:

- Conocer el funcionamiento de la comunicación serie síncrona.
- Saber programar el módulo de comunicación del  $\mu\text{C}$  en modo máster I2C.
- Saber programar un visualizador alfanumérico, tanto para inicializarlo como para enviar datos para su representación.
- Conocer las técnicas de depuración utilizando el osciloscopio digital y el analizador lógico.

La distribución general de las tareas (T) es la siguiente:

- T1.1: Estudio de la unidad de acoplamiento serie del  $\mu\text{C}$ .
- T1.2: Programación de una subrutina que envíe datos a través del bus I2C. Se proporcionan al alumno subrutinas para el control de la comunicación.
- T1.3: Conexión serie I2C de un visualizador alfanumérico al  $\mu\text{C}$ . Se estudian los comandos de control del visualizador, se conecta éste al  $\mu\text{C}$  y se prueba con un ejemplo facilitado por el profesor.
- T1.4: Monitorización del bus I2C con el osciloscopio. El alumno debe capturar una trama correspondiente al envío de un carácter (Fig. 3).
- T1.5: Repetición de la tarea anterior utilizando el analizador lógico.
- T1.6: Prueba de un programa que escriba un mensaje de bienvenida en el visualizador. A continuación, el alumno debe realizar una tarea libre para demostrar que ha trabajado las anteriores: crear un programa que escriba los números del 0 al 9 con una cadencia de 0.5 s.



(a)

(b)

Fig. 3. Envío de un carácter al visualizador: (a) Código ensamblador. (b) Captura de la trama I2C con el osciloscopio: CH1 datos y CH2 reloj.

En las tareas posteriores se debe incluir la entrega de la captura del analizador lógico de la T1.5, así como el código comentado y el diagrama de flujo del programa realizado en la T1.6.

**B. Práctica 2: Control de Entrada y Salida de Usuario por medio de un Teclado y un Visualizador.**

En esta práctica se estudia el modo de acoplamiento del teclado matricial al  $\mu C$ . Se debe integrar con el uso del visualizador de la Práctica 1 haciendo uso del diseño modular incluyendo en el programa los módulos ya probados. Los objetivos específicos de aprendizaje son: comprender el funcionamiento de un teclado matricial, y saber integrar en un nuevo programa subrutinas ya probadas.

El reparto de las tareas es el siguiente:

T2.1: Estudiar la conexión de un teclado matricial.

T2.2: Diseñar e implementar un algoritmo de exploración del teclado y un decodificador de las teclas pulsadas.

T2.3: Hacer un programa para el  $\mu C$  que escriba en el visualizador las teclas que se pulsan en el teclado.

**C. Práctica 3: Regulación de Velocidad en Bucle Abierto de un Motor de cc con un Control PWM**

En esta práctica se estudia el funcionamiento del periférico de captura y comparación del  $\mu C$  en modo PWM. Como ejemplo, se muestra un oscilograma con las señales que debe monitorizar el alumno (Fig. 4).

El programa principal debe estar en una rutina de interrupción que se ejecuta con el periodo de trabajo del regulador (0.5 s). Esta rutina la deben codificar los alumnos a partir de un diagrama de flujo proporcionado por el profesor.

Los objetivos específicos de aprendizaje son:

- Comprender el funcionamiento del módulo de captura y comparación del  $\mu C$  en modo PWM.
- Asentar conocimientos de programación de temporizadores/contadores, ADCs y rutinas de interrupción.

El reparto de las tareas es el siguiente:

T3.1: Estudio de la unidad de captura y comparación del  $\mu C$  en modo PWM.

T3.2: Programación de una subrutina de inicialización de la unidad de captura y comparación.

T3.3: Control del motor en bucle abierto. Programación del ADC para convertir la señal analógica del potenciómetro en una señal digital de consigna de velocidad.

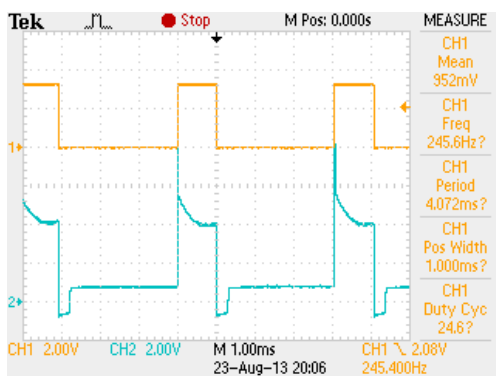


Fig. 4. Oscilogramas de las salidas del PWM del  $\mu C$  y del amplificador.

T3.4: Realización de las conexiones de la salida del modulador PWM, del amplificador de corriente y del motor, visualización de la señal PWM y medida de su valor medio.

**D. Práctica 4: Medida de Velocidad mediante un Sensor que Genera Impulsos de Frecuencia Variable**

Esta práctica complementa la anterior, introduciendo la medida de velocidad en el sistema de control del motor. Para ello, se realizan las conexiones de los nuevos elementos en la placa de prototipos, se programa una rutina de inicialización del temporizador 1 como contador y se amplía la funcionalidad de la rutina de interrupción. Los objetivos específicos de aprendizaje son:

- Comprender el funcionamiento de un sensor optoelectrónico de barrera y saber acoplarlo a un  $\mu C$ .
- Saber medir una velocidad en base al contaje de impulsos.
- Saber programar un periférico del  $\mu C$  como contador de eventos externos.

El reparto de las tareas es el siguiente:

T4.1: Estudio de la medida de la velocidad del motor por medio de una señal de impulsos que proporciona un sensor optoelectrónico de barrera.

T4.2: Programación de una subrutina que implemente un convertidor frecuencia a tensión que utilice los temporizadores del  $\mu C$  para convertir la frecuencia de los impulsos a un valor binario.

**E. Práctica 5: Regulación de Velocidad en Bucle Cerrado**

El principal avance de esta práctica consiste en cerrar el bucle de control mediante una realimentación negativa de la velocidad (Fig. 5). Los alumnos deben codificar los diagramas de flujo del regulador (Fig. 6) y de la versión final del programa principal que les son proporcionados por el profesor.

Los objetivos específicos de aprendizaje son:

- Tener capacidad para desarrollar un sistema hardware y software de complejidad media combinando módulos ya probados e integrando otros de nuevo diseño.
- Saber convertir datos en formato binario a BCD.
- Saber implementar un regulador básico de tipo PI que controle un proceso real con un  $\mu C$ .

El reparto de las tareas es el siguiente:

T5.1: Codificación de un regulador en bucle cerrado del tipo PI a partir de un diagrama de flujo. Integración en el proyecto de las subrutinas desarrolladas en las tareas anteriores.

T5.2: Conexión del visualizador para mostrar, por ejemplo, la consigna, la velocidad, el error y la señal de salida del regulador (la entrada del actuador).

T5.3: Conexión del teclado para introducir la consigna de velocidad y las órdenes de marcha y paro.

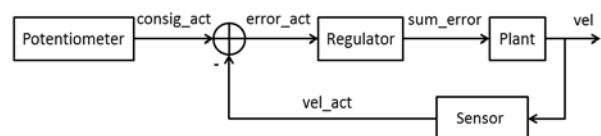


Fig. 5. Esquema funcional del regulador digital.



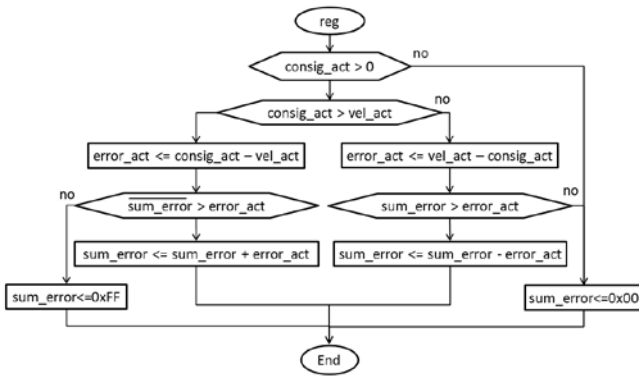


Fig. 6. Diagrama de flujo del regulador.

### III. PROYECTO #2: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN, PROCESADO Y GENERACIÓN DE DATOS BASADO EN FPGA

En este proyecto se implementa un sistema basado en FPGA con capacidad para procesar digitalmente una señal analógica. Como objetivo de aprendizaje, se debe adquirir un conocimiento práctico sobre el desarrollo de sistemas digitales de complejidad media implementados en FPGA y circuitos auxiliares externos. La FPGA utilizada es una Cyclone III, incluida en la placa de desarrollo DE0, y como periféricos se utilizan un ADC (MCP3001) y un DAC (MCP4911) insertados en la placa de prototipos (Fig. 7).

Con el fin de complementar el tema de comunicación serie síncrona tras estudiar el bus I2C en el Proyecto #1, en el Proyecto #2 se utiliza la comunicación serie SPI (*Serial Peripheral Interface*) para acoplar los periféricos.

Otro objetivo que complementa el Proyecto #1 es que los alumnos deben dibujar los esquemas de los montajes, que en el Proyecto #1 se proporciona como elemento de partida. Por tanto, además de describir en VHDL los circuitos que se implementan en la FPGA, deben dibujar esquemas eléctricos de los sistemas completos.

Al igual que en el caso anterior, las prácticas siguen un proceso incremental en el que se va dotando de funcionalidades nuevas al sistema. Los objetivos comunes a todas las prácticas son:

- Saber extraer información de las hojas de características de los circuitos para poder integrarlos en un sistema.
- Realizar sistemas con diseños jerárquicos.
- Saber simular y comprobar componentes y sistemas.

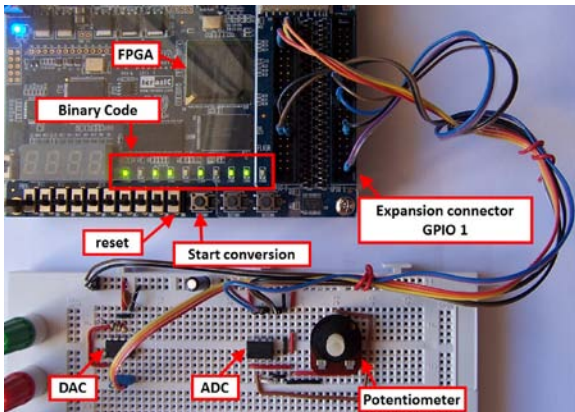


Fig. 7. Placas DE0 y de prototipos.

- Asignar terminales y utilizar circuitos externos conectados a la FPGA.
- Resolver problemas de sistemas digitales complejos reutilizando módulos ya probados.
- Saber realizar prototipos de sistemas digitales.

#### A. Práctica 6: Diseño e Implementación de una Unidad de Acoplamiento Serie SPI para un ADC

En esta práctica, se acopla a la FPGA mediante un ADC de 10 bits una señal analógica, obtenida con un potenciómetro, y la combinación digital resultante se visualiza en los LEDs de la placa DE0. Cada vez que se presiona el pulsador de inicio de conversión se debe realizar una adquisición.

Los objetivos específicos de aprendizaje son:

- Repasar el proceso de implementación de sistemas digitales en una FPGA.
- Comprender el funcionamiento y los parámetros de funcionamiento de un ADC.
- Comprender el funcionamiento de un controlador de un circuito externo conectado a la FPGA mediante SPI.
- Saber conectar un circuito ADC a un procesador digital en un prototipo de sistema digital.

El reparto de las tareas es el siguiente:

T6.1: Estudio de un módulo de control de la comunicación SPI y del formato de datos.

T6.2: Estudio del diseño e implementación de un módulo de control SPI para conexión a un ADC.

T6.3: Captura de una entrada analógica con un circuito ADC con interfaz SPI.

T6.4: Monitorización del puerto SPI con el analizador lógico (Fig. 8).

En la T6.2, se proporciona a los alumnos una descripción algorítmica en VHDL del módulo de control SPI y se les pide que realicen un diagrama de flujo. Una parte importante de la práctica se dedica a la configuración del módulo IP PLL para generar la señal de sincronismo.

#### B. Práctica 7: Diseño e Implementación de una Unidad de Acoplamiento Serie para un DAC.

En esta práctica se reconstruye una señal analógica a partir de una digital establecida con los 10 interruptores disponibles en la placa DE0. Un botón de la placa debe inicializar el sistema y otro debe dar la orden de inicio de conversión (transmisión del dato en formato serie al DAC). Cuando se finaliza una conversión, se debe indicar activando una señal de fin de conversión. En la Fig. 9 se muestra un ejemplo de captura de las señales SPI.

Como en la práctica anterior se utilizó una descripción algorítmica, en ésta se utiliza una descripción estructural.

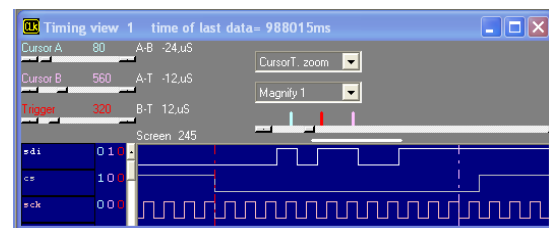


Fig. 8. Captura de una trama SPI de lectura de un dato discreto.

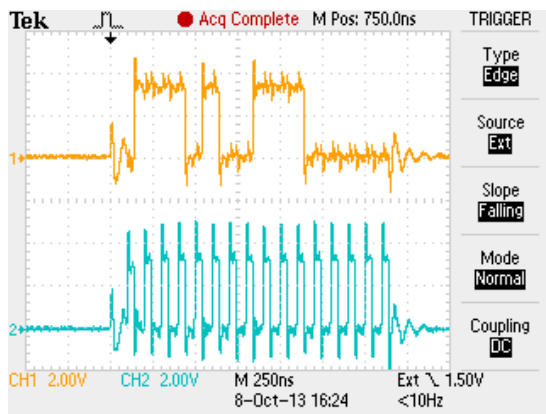


Fig. 9. Oscilograma de las señales SPI del DAC.

Las descripciones de los componentes se les facilitan a los alumnos, que deben simularlas y obtener una descripción estructural del circuito.

Los objetivos específicos de aprendizaje son:

- Saber implementar circuitos secuenciales síncronos.
- Realizar descripciones estructurales y funcionales en VHDL de circuitos secuenciales sencillos.
- Conocer el funcionamiento del bus SPI.
- Conocer el funcionamiento de los circuitos DAC.

El reparto de las tareas es el siguiente:

- T7.1: Diseño e implementación de un módulo de control SPI para conexión a un DAC.
- T7.2: Generación de una señal analógica a partir de un dato digital establecido con los interruptores externos conectados a la FPGA.
- T7.3: Utilización del osciloscopio y del analizador lógico para monitorizar el puerto SPI.

#### C. Práctica 8: Diseño y Modelado de una Memoria en FPGA para Implementar una Tabla de Búsqueda.

En esta práctica se sintetiza una señal analógica de salida. Para ello se debe implementar una tabla de búsqueda (LUT: Look Up Table) utilizando una memoria ROM que se genera utilizando las herramientas de creación de componentes que proporciona el software de desarrollo Quartus II. Para inicializar el contenido de la memoria ROM se debe generar un fichero con el formato adecuado, que contenga los datos a almacenar en cada posición de la memoria. En este caso estos datos corresponden a una señal sinusoidal.

En esta práctica el reloj se sintetiza con un divisor de frecuencia que utiliza recursos lógicos, en vez de utilizar un módulo PLL.

Los objetivos específicos de aprendizaje son:

- Saber crear un componente nuevo a partir de la biblioteca del fabricante de FPGAs.
- Realizar descripciones estructurales y funcionales en VHDL reutilizando componentes ya creados.
- Saber implementar un sistema digital que reconstruya una señal en tiempo real.
- Saber generar señales periódicas con una LUT.

El reparto de las tareas es el siguiente:

T8.1: Implementación de una LUT con los datos de una señal a reconstruir (Fig. 10).

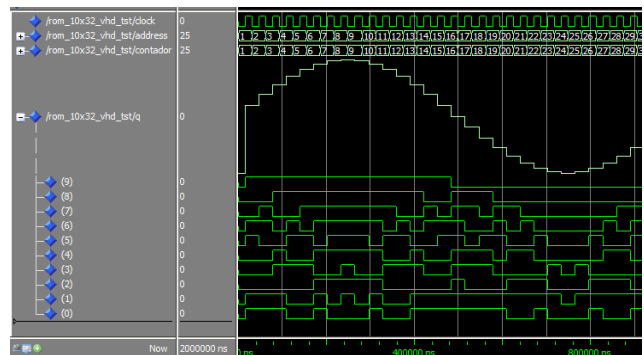


Fig. 10. Detalle de la simulación de la LUT para generar una sinusoida.

T8.2: Generación de una señal analógica utilizando la LUT y el controlador SPI del DAC.

T8.3: Monitorización de la señal generada con el osciloscopio.

#### D. Práctica 9: Implementación de un Sistema de Procesado Digital de una Señal Analógica en Tiempo Real.

En esta práctica se integran los módulos desarrollados en las prácticas anteriores junto con uno nuevo que implementa un filtro de promediado. Previamente, el alumno debe probar la respuesta impulsional del filtro, configurando la descripción facilitada por el profesor con 8 bits de datos y 4 etapas. La salida debe valer 63 durante cuatro ciclos cuando se le introduce un impulso de 255 durante un ciclo de reloj. Además, en las tareas previas se debe realizar un esquema eléctrico del hardware y la descripción estructural de jerarquía superior en la que se integran los distintos componentes VHDL. El reparto de las tareas es el siguiente:

T9.1: Con los recursos hardware de las prácticas anteriores, se realiza un *bypass* con una señal analógica de entrada, obtenida del generador, que se reconstruye para mostrarla en el osciloscopio.

T9.2: Implementación de un filtro digital de promediado para intercalar en el circuito de la tarea anterior: entrada analógica – filtro digital – salida analógica.

Finalmente, cada grupo debe realizar una tabla con la respuesta en frecuencia del filtro de promediado.

## IV. RESULTADOS

El plan de prácticas se ha evaluado a través de encuestas realizadas a los alumnos en los cursos 2015/16 y 2016/17. En la Tabla I se muestran los resultados de las encuestas referidas a las prácticas en general.

Cuando se comparan con las de las otras asignaturas, los alumnos consideran que las prácticas de SED tienen un nivel de dificultad medio-alto y que son más interesantes.

Si se compara la carga de trabajo de las prácticas con la asignatura en su conjunto, los alumnos opinan que está repartida por igual o, quizás, un poco más de carga en las prácticas.

Donde hay más diversidad de opinión es en la pregunta 4, respecto a la medida en que la preparación de las prácticas les ayuda a fijar los conceptos de teoría.

TABLA I.  
RESPUESTAS A LAS PREGUNTAS GENERALES DE LAS ENCUESTAS.

Nº	Pregunta/opción/respuesta	15/16	16/17	MEDIA
1	Las prácticas de SED, comparadas con las prácticas de las demás asignaturas de 4º curso,...			
	son mucho más difíciles	14%	20%	17%
	son algo más difíciles	57%	47%	52%
	en promedio tienen la misma dificultad	29%	33%	31%
	son más fáciles	0%	0%	0%
2	Las prácticas de SED, comparadas con las prácticas de las demás asignaturas de 4º curso, son...			
	poco interesantes	7%	0%	7%
	igual de interesantes	7%	20%	13%
	algo más interesantes	29%	0%	29%
	más interesantes	36%	67%	51%
3	¿Cuál es el peso que crees que tiene la carga de trabajo de las prácticas de SED en relación con la asignatura en su conjunto?			
	0-20%	7%	0%	7%
	20-40%	14%	27%	20%
	40-60%	43%	47%	45%
	60-80%	36%	20%	28%
4	¿En qué medida crees que las prácticas te han servido para aprender los temas de la asignatura?			
	He aprendido poco o nada, creo que no son necesarias.	0%	0%	0%
	He aprendido poco.	21%	13%	34%
	He aprendido bastante.	29%	40%	34%
	He aprendido mucho	29%	33%	31%
5	¿Te han motivado en tu trabajo de preparación de la asignatura las prácticas?			
	Nada	0%	0%	0%
	Muy poco	0%	0%	0%
	Poco	21%	20%	20%
	Bastante	64%	73%	68%
6	¿Consideras apropiada la metodología de las prácticas orientadas a la realización de proyectos de sistemas complejos en relación con las prácticas centradas en tareas más simples e independientes entre sí?			
	Nada	0%	0%	0%
	Muy poco	0%	7%	3%
	Poco	7%	0%	3%
	Bastante	50%	67%	58%
7	¿Consideras que los proyectos realizados en las prácticas son realistas, es decir, tienen aplicación práctica real?			
	Nada	0%	0%	0%
	Muy poco	0%	0%	0%
	Poco	21%	13%	17%
	Bastante	57%	67%	62%
8	¿Consideras que las prácticas son realistas y que la metodología es apropiada (un 93%)			
	son mucho más fáciles	0%	0%	0%
	son algo más fáciles	57%	47%	52%
	en promedio tienen la misma dificultad	29%	33%	31%
	son más fáciles	0%	0%	0%

Sin embargo, un alto porcentaje (78%) opinan que las prácticas les han motivado, lo cual cumple con las expectativas del trabajo presentado, aunque un 20% de los alumnos considera que las prácticas les han motivado poco en la preparación de la asignatura.

Como otros de los aspectos más positivos, cabe resaltar que la mayoría de los alumnos (82%) opinan que las

prácticas son realistas y que la metodología es apropiada (un 93%).

En la Tabla II se muestran los resultados de las encuestas referidas al Proyecto #1. La encuesta revela que la mayoría considera que el proyecto es adecuado para desarrollar el contenido de la asignatura (89%) y solo un 10% lo considera poco adecuado.

En las preguntas 2 y 3 también hay bastante unanimidad. La mayoría consideran que es bastante o muy bueno construir su propio prototipo y están satisfechos con el resultado global.

La mayoría opinan que es adecuado el grado en el que está guiado el proyecto, aunque algunos alumnos han planteado que les gustaría un proyecto más libre o poder elegir la aplicación. La mayoría, un 86%, consideran que el grado de complejidad es adecuado. Es más contundente la respuesta relativa a la idoneidad del tema, todos consideran que es bastante o muy adecuado.

En cuanto a los equipamientos y materiales, aunque la mayoría considera que son bastante o muy adecuados, hay un 29% que no los ve suficientes. Al igual que en la pregunta relativa a las guías de las prácticas, en la que hay un pequeño porcentaje que considera que son poco adecuadas. En general, estos dos aspectos se pueden mejorar. Por último, resaltar que una amplia mayoría manifiesta que la metodología les facilita su trabajo autónomo, lo cual es muy positivo, pues es uno de sus principales objetivos.

TABLA II.  
RESPUESTAS DE LOS ALUMNOS EN RELACIÓN CON EL PROYECTO #1.

Nº	Pregunta/curso	15/16	16/17	MEDIA	Muy poco o nada	Poco	Bastante	Mucho
1	¿Consideras que es adecuado para desarrollar los contenidos de la asignatura?	15/16	16/17	Media	0%	0%	10%	55%
		0%	0%	0%	21%	43%	36%	33%
		0%	10%	55%	34%			
2	¿Crees que es bueno construir tu propio prototipo del sistema de control electrónico?	15/16	16/17	Media	0%	0%	3%	55%
		0%	7%	47%	36%	47%	41%	
		0%	3%	55%	41%			
3	¿Estas satisfecho con el resultado global del prototipo que has realizado?	15/16	16/17	Media	0%	14%	6%	55%
		0%	13%	53%	43%	20%	31%	
		7%	6%	55%	31%			
4	¿Es adecuado el grado en que esta guiado o debiera ser más libre?	15/16	16/17	Media	7%	14%	13%	62%
		7%	13%	53%	7%	20%	13%	
		10%	13%	62%	13%			
5	¿Es adecuado el grado de complejidad?	15/16	16/17	Media	0%	14%	7%	79%
		0%	14%	80%	7%	7%	79%	7%
		7%	7%	79%	7%			
6	¿Consideras que el tema elegido (control electrónico de velocidad) es adecuado a tu perfil de graduado?	15/16	16/17	Media	0%	0%	0%	65%
		0%	0%	65%	71%	29%	40%	34%
		0%	0%	65%	34%			
7	¿Consideras que los equipamientos y materiales de trabajo en el laboratorio son buenos?	15/16	16/17	Media	0%	29%	29%	43%
		0%	7%	60%	27%	43%	27%	35%
		3%	18%	44%	35%			
8	¿Consideras que las guías de las prácticas son útiles y están bien organizadas y redactadas?	15/16	16/17	Media	0%	14%	7%	58%
		0%	7%	53%	21%	40%	30%	
		0%	10%	58%	30%			
9	¿Consideras que facilita tu trabajo autónomo?	15/16	16/17	Media	0%	14%	7%	60%
		0%	7%	60%	14%	33%	23%	
		0%	10%	65%	23%			

## V. CONCLUSIONES

Se ha presentado la aplicación de PBL a la asignatura SED de cuarto curso del Grado de Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática de la Universidad de Vigo y la experiencia obtenida de dicha aplicación. Las prácticas se agrupan en dos proyectos semiguidados. Uno, basado en microcontrolador, implementa un control digital de velocidad. Y el otro, basado en FPGA, implementa un sistema de procesado en tiempo real de una señal analógica. Se destaca la importancia de la evaluación continua y del papel del profesor como guía del trabajo del alumno.

Se ha alcanzado un compromiso equilibrado entre la realización de prácticas con actividades controladas y libres. Los alumnos han valorado positivamente la metodología seguida, así como el grado de dificultad, los resultados que han obtenido y la adecuación a su perfil.

## REFERENCIAS

- [1] C.Quintáns, J.Fariña y J.J.Rodríguez Andina, "Experiencia de prácticas basadas en proyectos semiguidados para el aprendizaje de sistemas electrónicos digitales", *Actas del XII Congreso en Tecnologías, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica*, pp. 336-345, Sevilla, Jun. 2016.
- [2] M.A.Perales, F.Barrero y S.L.Toral, "Learning achievements using a PBL-based methodology in an introductory electronics course", *IEEE RITA*, vol. 10, no. 4, pp. 296-301, Nov. 2015.
- [3] J.Alberto Naves, T.D'Angelo y P.Marcos de Barros, "Experiência de aprendizagem baseada em projetos no ensino de robótica", *VAEP-RITA*, vol. 2, no. 4, pp. 183-190, Dic. 2014 (en portugués).
- [4] J.J.Rodríguez Andina, L.Gomes y S.Bogosyan, "Current trends in industrial electronics education", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 57, no. 10, pp. 3245-3252, Oct. 2010.
- [5] J.F.Wakerly, *Digital Design: Principles and Practices*. New Jersey, Prentice Hall, 2007.
- [6] F.E.Valdes, R.Pallás, *Microcontroladores. Fundamentos y aplicaciones con PIC*. Barcelona, Marcombo, 2007.
- [7] A. Pardo, "Problem-based learning combined with project-based learning: a pilot application in Digital Signal Processing", *Actas del XI Congreso en Tecnologías, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica*, pp. 36-40, Bilbao, Jun., 2014.
- [8] E.Goikoetxea y G.Pascual, "Aprendizaje cooperativo: Bases teóricas y hallazgos empíricos que explican su eficacia". *Educación XXI*. UNED, vol. 5, pp. 227-247. 2002.
- [9] Centro Virtual Cervantes. *Diccionario de términos clave de ELE*. [En línea]. Disponible: [http://cvc.cervantes.es/ensenanza/biblioteca\\_ele/diccio\\_ele/indice.htm](http://cvc.cervantes.es/ensenanza/biblioteca_ele/diccio_ele/indice.htm)
- [10] Jungkuk Kim, "An ill-structured PBL-based microprocessor course without formal laboratory," *IEEE Trans. Educ.*, vol. 55, no. 1, pp. 145-153, Feb. 2012.
- [11] A.Vázquez, A.Rodríguez, M.Arias, P.F.Miñaja, D.G.Lamar, M.Hernando y J.Sebastián, "Aprendizaje basado en proyectos mediante el montaje de un kit de comunicaciones", *Actas del XI Congreso en Tecnologías, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica*, pp. 41-45, Bilbao, Jun. 2014.
- [12] P.Debiec y M.Byczuk, "Teaching discrete and programmable logic design techniques using a single laboratory board", *IEEE Trans. Educ.*, vol. 54, no. 4, pp. 652-656, Nov. 2011.
- [13] L.Gil-Sánchez, R.Masot y M.Alcañiz, "Enseñanza de la electrónica a ingenieros aeronáuticos mediante el desarrollo de proyectos", *VAEP-RITA*, vol. 2, no. 4, pp. 159-166, Dic. 2014.



**Camilo Quintáns Graña** es Ingeniero Técnico Industrial por la Universidad de Vigo (1997), y es Ingeniero Industrial (2005) y Doctor (2008) por la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), Madrid. Desde 1997 a 2001 trabajó en la industria dentro del campo de la generación eléctrica. Ha trabajado como Profesor Asociado (2000-2010) en el Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad de Vigo y en la actualidad es Profesor Contratado Doctor. Sus

líneas de trabajo se enmarcan, en primer lugar, en el modelado y simulación de sistema y en los circuitos mixtos analógico-digitales aplicados a la instrumentación y control. Y, en segundo lugar, en la mejora de la docencia de la electrónica. Fue miembro del equipo directivo del Centro Asociado de la UNED en Pontevedra (2008-2009). Es socio fundador y miembro de la directiva de la Asociación TAEE, Secretario (2012-2016) y actual Tesorero.



**José Fariña Rodríguez** (M'04) es Ingeniero Industrial (1984) y Doctor Ingeniero Industrial (1989) por la Universidad de Santiago de Compostela. Es Profesor Titular de Universidad en el Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad de Vigo. Es autor de más de 90 artículos en revista y congresos e inventor de varias patentes en España, Europa y USA. Sus áreas de interés incluyen dos líneas de trabajo relacionadas con el diseño de sensores inteligentes para medida indirecta de variables en procesos industriales y la implementación en

dispositivos reconfigurables de algoritmos complejos para el control de procesos industriales en tiempo real.



**Juan J. Rodríguez Andina** (M'00-SM'04) es Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid (1990) y Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad de Vigo (1996). Es Profesor Titular del Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad de Vigo. En 2010-2011 fue Visiting Professor en el Advanced Diagnosis, Automation, and Control Laboratory, Electrical and Computer Engineering Department, North Carolina State University, Raleigh. Sus

líneas de investigación incluyen la implementación en FPGAs de algoritmos complejos de control y procesado y el test concurrente de sistemas complejos, en los ámbitos de la Electrónica Digital y la Electrónica Industrial. Es autor de más de 130 artículos en revistas y congresos, e inventor de diversas patentes en España, Portugal y EEUU. Es Past Editor-in-Chief de *IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS MAGAZINE* (revista de la que fue Editor Jefe en 2013-2015) y Editor Asociado de *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS* e *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS*.