

Uso de plataformas digitales para el control de convertidores de potencia conmutados

Alberto Rodríguez, Manuel Arias, Aitor Vázquez, Ignacio Castro, Kevin Martin y Diego G. Lamar.

Grupo de Sistemas Electrónicos de Alimentación (SEA). Universidad de Oviedo

Gijón. España

e-mail: rodriguezalberto@uniovi.es

Resumen— El proceso de innovación en el diseño de Convertidores de Potencia Conmutados (CPCs) implica el desarrollo de prototipos que permitan validar el correcto funcionamiento de nuevas ideas implementadas en los mismos. Un CPC se compone de dos bloques claramente diferenciados: el circuito de potencia y el circuito de control. La utilización de plataformas digitales para realizar el control del circuito de potencia en CPCs permite no sólo una gran agilidad y flexibilidad a la hora de validar nuevos conceptos relativos a sus técnicas de control, sino una gran rapidez en su verificación (i.e. prototipado rápido). En este artículo se presenta la planificación y metodología de un curso de control digital orientado específicamente al desarrollo de módulos de control para CPCs, cuyo objetivo principal es dar al alumno una realimentación instantánea del trabajo realizado a través de la verificación experimental.

Palabras clave— Control digital, DLP, Convertidor de Potencia Conmutado (CPC), prototipado rápido

I. INTRODUCCIÓN

Los convertidores de potencia conmutados (CPC) han sido controlados durante años mediante técnicas analógicas. La tendencia actual es la sustitución de estos controladores analógicos por otros digitales. Una de las razones principales es el aumento en prestaciones y reducción en precio de los sistemas digitales en comparación con los analógicos [1].

Aún existen una gran cantidad de aplicaciones en las que la solución analógica es más apropiada, sobre todo si el control a realizar es sencillo. En cualquier caso, todo parece indicar que en un futuro cercano se sustituirá la práctica totalidad de los controladores analógicos de convertidores conmutados por otros digitales. La mayoría de los autores que se pronuncian sobre el tema [2]-[3], coinciden en que la versión digital se impondrá en un futuro cercano para el control de convertidores conmutados.

Para justificar la conveniencia de la implantación de soluciones digitales hay que plantearse las ventajas e inconvenientes de la misma frente a la analógica. En [1] se presenta un análisis detallado de las ventajas e inconvenientes más relevantes actualmente. De una manera muy resumida, dentro las ventajas de la tecnología digital que han propiciado la tendencia a su incorporación en el control de CPC cabe destacar: la capacidad de realizar tareas más complejas, la capacidad de reprogramación del control, la posibilidad de incorporar de manera sencilla la monitorización de distintas variables, la mayor integración alcanzable, la menor

sensibilidad al ruido o a cambios como la temperatura o el envejecimiento, el menor tiempo de diseño o la fiabilidad y reproducibilidad (gracias al menor número de componentes discretos). Por el contrario, los principales inconvenientes se pueden resumir en: la necesidad de utilizar convertidores de señales analógicas a digitales (ADC) o digitales a analógicas (DAC), la limitación de la resolución de la medida, del cálculo y de la señal de control, la introducción de retardos en el control o la limitación del ancho de banda. Otras desventajas importantes, pero que en la actualidad su relevancia está disminuyendo, son el incremento de precio y la necesidad de aprendizaje y adaptación del diseñador del control.

Quizás el factor más determinante a la hora de retrasar el cambio a controles digitales sea el hecho de que la mayoría de los diseñadores de control de convertidores conmutados son expertos en el uso y diseño de controles analógicos, pero desconocen las técnicas digitales. Sin embargo, como se ha mencionado previamente, el control digital resume una gran parte de sus ventajas en la gran flexibilidad que proporciona al control de convertidores, haciendo que estas técnicas sean de especial interés en el ámbito académico y de investigación, permitiendo realizar un prototipado rápido de CPC y la posibilidad de validar nuevos conceptos de técnicas de control. Basándonos en estas premisas hemos considerado de gran interés el desarrollo de un curso de control digital orientado específicamente al desarrollo de módulos de control para CPCs.

Las ventajas e inconvenientes del control digital frente al analógico, se deben sopesar en cada aplicación concreta para la elección de la técnica más apropiada. Las primeras aplicaciones de potencia que incorporaron un control digital fueron aquellas más complejas, como el control de motores, pues son en las que más fácilmente se ha justificado el paso de tecnología analógica a digital. Dentro de esta expansión del control digital para CPC han tomado un interés creciente los controles de convertidores con salida en corriente continua, en principio más sencillos y por tanto los últimos en considerarse para el control digital.

Tanto en el caso de CPC más complejos, como en el caso de convertidores sencillos, en todos ellos es sencillo detectar al menos dos partes bien diferenciadas: una etapa de potencia, en general compuesta por dispositivos electrónicos de potencia (semiconductores, elementos magnéticos, condensadores, etc.), y una etapa de control, que puede estar compuesta por electrónica analógica o digital. La Fig. 1 muestra un esquema de un CPC diferenciando las partes de potencia y de control.

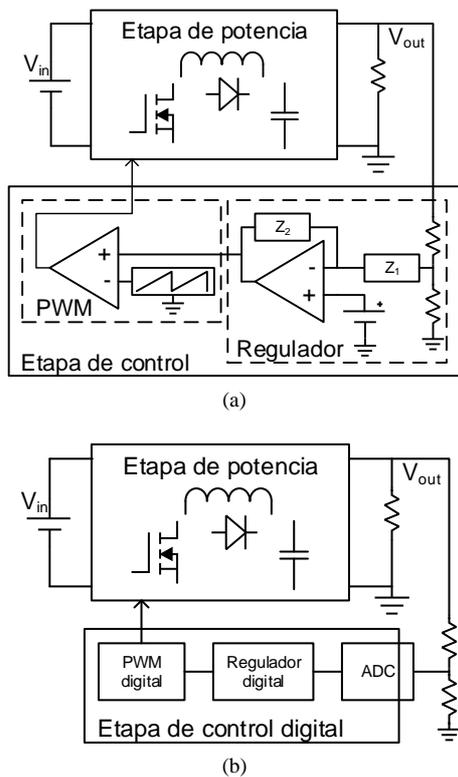


Fig. 1. Esquema de un CPC detallando el circuito de potencia y de control. (a) Tradicional esquema simplificado de control analógico y (b) de control digital.

En este artículo se detalla la planificación y metodología docente de un curso de treinta horas orientado a personas ya formadas (nivel master o empresa) en la materia relativa a Convertidores de Potencia Conmutados (CPCs). El curso sigue la metodología del Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) [4]-[5], integrando ejercicios prácticos a realizar por el alumno, con la impartición de la teoría necesaria para el desarrollo de los mismos. Por su carácter primordialmente práctico este curso se ofrece a un máximo de diez alumnos con conocimientos en la materia, lo que hace que su planificación y metodología sea muy particular.

En principio, el curso se centra en el control de CPCs sencillos, aunque la mayoría de los conceptos tratados son extrapolables al control de CPCs más complejos. Además, la estructura del curso trata de asentar los conceptos básicos del control digital de una manera clara para posteriormente proponer distintas posibilidades comerciales de utilización. Uno de los objetivos más ambiciosos del curso es no sólo proporcionar conocimientos de las actuales posibilidades existentes sino conseguir que el alumno pueda ampliar posteriormente sus conocimientos de una manera autónoma.

La estructura de este artículo es la siguiente: tras una pequeña introducción del control digital en la electrónica de potencia expuesta en el apartado I, se procede a la descripción de la estructura del curso en el apartado II. Posteriormente, en el apartado III se mencionarán los resultados y dificultades que se han observado durante la ejecución del curso y por último se proporcionan algunas conclusiones extraídas en el apartado IV.

II. ESTRUCTURA DEL CURSO

Como se ha mencionado previamente el curso está basado en el ABP. Al ser un curso eminentemente práctico y orientado a alumnos con conocimientos previos de electrónica de potencia y de control de CPC, el objetivo del fundamental del curso es doble. Por un lado, se desea que tras la recepción del curso los alumnos tengan las capacidades necesarias para implementar soluciones de control digital sencillas. Por otro lado, y lo que se considera más importante, que puedan desarrollar sus capacidades de una manera autónoma para poder realizar controles más complejos.

Para cumplir con los objetivos propuestos, los alumnos tienen que realizar ejercicios prácticos relacionados con los contenidos teóricos expuestos con anterioridad. Esta estructura, donde una exposición teórica es seguida por un desarrollo práctico semi-autónomo (con ayuda del profesorado si es necesaria) del alumno, se repite durante los distintos días de impartición del curso.

La planificación temporal del curso no prevé carga adicional autónoma por parte del alumno, además de los ejercicios propuestos en clase, durante los días de impartición del curso. Sin embargo, tras la finalización del curso, se recomienda que se continúe realizando ciertos ejercicios para la completa asimilación de los contenidos adquiridos y su profundización.

A. Agenda del curso

La TABLA I muestra una descripción detallada de la agenda del curso. Como se puede observar, el curso se ha desarrollado e impartido en inglés con el objetivo de poder llegar a un mayor número de potenciales alumnos. Teniendo en cuenta que la nomenclatura técnica de las instrucciones de programación y del material a utilizar en el control digital es mayoritariamente anglosajona, la impartición del curso puede llevarse a cabo (utilizando el material desarrollado) tanto en inglés como en castellano, en función de las necesidades de los alumnos.

Inicialmente, en el primer día del curso, se introducen las necesidades, tanto software como hardware, para la implementación de un sistema de control digital para un prototipo de CPC. Se presentan distintas plataformas digitales (microcontroladores, DSP, FPGA, etc.) con la funcionalidades necesarias para la implementación del control digital de un CPC, haciendo hincapié en las diferencias entre cada una de ellas y en las aplicaciones concretas en las que el uso de una u otra plataforma es recomendable.

Con respecto a las distintas plataformas digitales, se introducen también las diferencias entre una programación secuencial y concurrente, proponiendo ejemplos que deberá realizar el alumno y que clarificará las diferencias entre estos dos tipos de programación. Además, se presentan plataformas que permiten la implementación de un control digital para un CPC a través de un interfaz gráfico, que facilita el uso de técnicas digitales a personas sin profundos conocimientos de control digital [6].

En el segundo día, el curso se centra en el uso de dispositivos lógicos programables (DLP) (específicamente del

fabricante Xilinx [7]) y el lenguaje de descripción de hardware VHDL [8], presentando las características y las instrucciones esenciales de los mismos. Una vez se repasan los conceptos básicos, se proponen distintos ejercicios prácticos que los alumnos deben desarrollar autónomamente. Los mencionados ejercicios se deben implementar utilizando una herramienta de simulación que previamente se muestra a los alumnos. Debido a la continua evolución del software específico de simulación, se muestran varias posibilidades, aunque no se hace demasiado hincapié en el funcionamiento interno y exhaustivo de ninguna de ellas. De manera resumida, se presentan, para cada programa de simulación, las funcionalidades necesarias para la validación de los bloques de código que los alumnos deben desarrollar. Además se introduce de manera somera la posibilidad de realizar una co-simulación utilizando distintos programas de simulación electrónica y de simulación de código VHDL.

En el tercer día del curso, los ejercicios propuestos están orientados directamente a la implementación, mediante código VHDL, de distintos bloques funcionales que permitirán el control digital de los CPC, como: comparadores, divisores de frecuencia, señales en rampa, señales PWM, reguladores digitales, etc. Además de la implementación de este tipo de bloques funcionales se propone el uso de distintas herramientas de simulación para la incorporación de características propias de la etapa de potencia del CPC. En este punto, los alumnos ya serían capaces de reproducir en simulación el funcionamiento completo de un CPC controlado digitalmente en lazo abierto (Fig. 2).

TABLA I. AGENDA DETALLADA DEL CURSO

DAY 1	
Section 1: 1h Introduction	<ul style="list-style-type: none"> - What is an FPGA? - How to program an FPGA (software & hardware)? - FPGAs in the market - Commercial software and hardware - Concurrent vs Sequential - Advantages and disadvantages of VHDL
Section 2: 1h Basic elements	<ul style="list-style-type: none"> - Objects, Identifiers, Data Types, Operators. - Creation of new types and subtypes
Section 3: 1h Entities and architectures	<ul style="list-style-type: none"> - Concept of entity - Concept of architecture - Entity's ports directionality
Hands-on 1: 2h First contact	<ul style="list-style-type: none"> - Getting familiar with the design software - Designing the first program - Programming the FPGA
DAY 2	
Section 4: 1h Concurrent design	<ul style="list-style-type: none"> - Non conditional assignments - Conditional assignments - Blocks

Hands-on 2: 2h Simulation and concurrent design	<ul style="list-style-type: none"> - Using ModelSim (simulation tool) - Designing concurrent programs"
Section 5: 2h Sequential design	<ul style="list-style-type: none"> - Processes - Sequential instructions - Signal vs variable - Loops
Section 6: 1h Hierarchical design	<ul style="list-style-type: none"> - Components
Hands-on 3: 1h Concurrent and sequential design	<ul style="list-style-type: none"> - Designing a program with sequential and concurrent instructions
DAY 3	
Hands-on 4: 3h FPGAs & power electronics in open loop	<ul style="list-style-type: none"> - Building clock dividers - Building ramp generators - Building comparators - Obtaining complementary signals - Implementing delays - Implementing phase-shifted signals - Connecting everything (components and hierarchical design)
Section 7: 1h Model of a converter	<ul style="list-style-type: none"> - Different options for including the model of the converter - Psim - ModelSim
Hands-on 5: 2h Inclusion of the model in the design vs real converter	<ul style="list-style-type: none"> - Including the model in the design - Comparing simulation and experimental results
DAY 4	
Section 8: 1h Libraries and packages	
Section 9: 2h Miscellany	<ul style="list-style-type: none"> - Functions and procedures - Resolved signals and types - Assert-Report - Shared variables
Section 10: 3h digital control theory	<ul style="list-style-type: none"> - Introduction to digital-control design - Discrete time - Quantization effects - High resolution DPWM
DAY 5	
Section 10: 3h Digital control theory	<ul style="list-style-type: none"> - Practical example of a PI regulator design - Hints
Hands-on 6: 3h Inclusion of the controller	<ul style="list-style-type: none"> - Designing the controller block - Testing the results in simulation - Using the FPGA for controlling a real converter
Section 11: Questions	<ul style="list-style-type: none"> - Comments - Examples, other hands-on

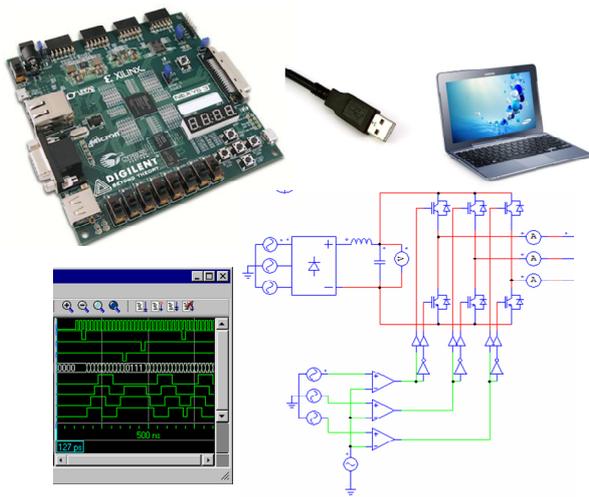


Fig. 2. Representación de la simulación del control digital de un CPC.

El objetivo principal del cuarto día del curso es la introducción del diseño e implementación de lazo de realimentación digital. En general, es necesaria una introducción al uso de señales discretas para la implementación del control de un CPC, debido a que existen importantes peculiaridades y diferencias con respecto al análisis dinámico de un CPC considerando señales continuas o discretas para su control.

Por último, el quinto día del curso se realiza una implementación práctica de un lazo de realimentación digital en un CPC, permitiendo validar todos los conceptos previamente analizados en simulación en una plataforma experimental.

Durante los cinco días de duración del curso, basándose en la metodología del ABP, los alumnos van desarrollando y validando los mencionados bloques funcionales, que posteriormente son usados para el control de CPCs. Para ello, se dispone de sencillos prototipos de la etapa de potencia de un convertidor elevador, pensados y adaptados específicamente para ser controlados por la plataforma seleccionada (Fig. 3(a)). Este prototipado rápido, junto con instrumental clásico de un laboratorio de electrónica (fuentes, multímetros, osciloscopios, etc.) permite que se produzca una realimentación instantánea del trabajo realizado por el alumno, que no es habitual conseguir en este contexto (verificación del funcionamiento en lazo abierto, lazo cerrado, protecciones, etc.).

B. Materiales necesarios para el desarrollo del curso

En la Fig. 3(b) se muestra un puesto de trabajo de los participantes en el curso. Para realizar el control del convertidor y verificar el correcto funcionamiento de los bloques funcionales que han sido previamente programados son necesarios los siguientes materiales:

- Una plataforma de evaluación de FPGA. En el caso de la Fig. 3(b) se puede observar una FPGA muy básica (Basys 2 de Digilent [9]), pero que es suficientemente válida para los objetivos del curso. Otras posibilidades se mencionan

durante la impartición del curso para que los alumnos puedan seleccionar en función de sus necesidades.

- Un CPC. Un convertidor elevador es sencillo y suficientemente funcional. Se recomienda utilizar un convertidor elevador que implemente rectificación síncrona, para que sea necesario desarrollar señales de puerta complementarias y con tiempos muertos. La generación de estas señales puede ser utilizado como un sencillo ejercicio para el desarrollo de las capacidades de los alumnos. La Fig. 3(a) muestra además de la parte de potencia del CPC la circuitería de adaptación y aislamiento de las señales de control de los MOSFETs.
- Una fuente de alimentación para proporcionar tensión de alimentación a la circuitería de control y la tensión de entrada al CPC.
- Equipamiento de análisis de señales eléctricas, como un osciloscopio y un multímetro.

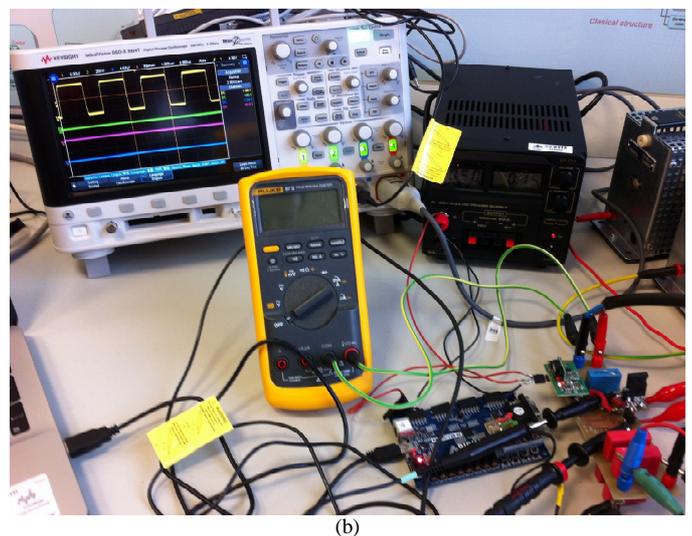
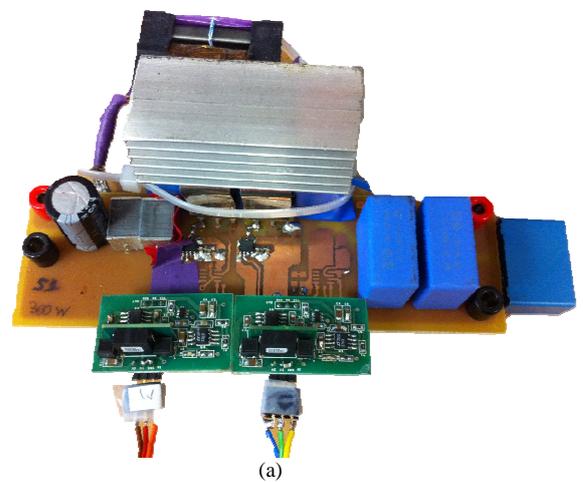


Fig. 3. (a) Fotografía del prototipo del elevador utilizado para realizar las pruebas del control digital con los bloques funcionales desarrollados por el alumno. (b) Apararunta utilizada para las pruebas experimentales.

Obviamente, cualquiera de los materiales mencionados previamente y utilizados para la impartición del curso puede ser reemplazado por equipamiento equivalente. Además, aunque se considera interesante que cada uno de los participantes en el curso pueda validar los bloques funcionales desarrollados de manera independiente y autónoma, cabe la posibilidad de habilitar un puesto para cada dos alumnos del curso, permitiendo el incremento del número de alumnos sin incrementar en demasía el material necesario.

III. RESULTADOS OBTENIDOS Y PROBLEMAS DETECTADOS

La primera edición del curso se ha desarrollado con buenos resultados de aprendizaje y con satisfacción por parte del alumnado. El objetivo del curso es alcanzar los siguientes resultados de aprendizaje:

- El alumno debe ser capaz de seleccionar la plataforma de control (bien digital o analógica) adecuada para un CPC, basándose en las especificaciones del mismo.
- El alumno debe ser capaz de implementar bloques funcionales sencillos en lenguaje VHDL que permiten el control en lazo abierto de un CPC.
- El alumno debe ser capaz de seleccionar la herramienta de simulación adecuada para validar los bloques funcionales implementados.
- Evidentemente, la tecnología relacionada con el control digital esta en continua evolución, por lo que los programas y materiales utilizados y analizados en este curso, pronto serán obsoletos. Por este motivo, es importante que el alumno también sea capaz de analizar la evolución de las distintas plataformas de control digital y en un futuro poder seleccionarlas en función de sus necesidades.

Para cumplir con el cuarto objetivo mencionado, se hace hincapié en el comienzo del curso en los principios básicos de funcionamiento de las distintas tecnologías existentes en la actualidad. Por desgracia, es difícil poder valorar por el momento el cumplimiento de este último objetivo, mientras que los tres primeros objetivos se considera que han sido alcanzados de manera satisfactoria.

La mayor dificultad encontrada en el desarrollo del curso ha sido el volumen de materia a impartir en el tiempo planificado, con la consiguiente dificultad en la asimilación de los conocimientos por parte del alumno. Aunque los alumnos poseen unos conocimientos previos importantes en el ámbito de la electrónica de potencia, los conocimientos en el ámbito del control digital pueden ser escasos o nulos. Por este motivo, puede resultar complicado asimilar con rapidez los conceptos impartidos, sobre todo al comienzo del curso. Esta dificultad sumada a la gran densidad de conocimientos a impartir hace que sea necesaria cierta ayuda en la implementación de los bloques funcionales para el control digital del CPC por parte del alumnado. La necesidad de este apoyo exige una mayor cantidad de profesorado, al menos en las fases de desarrollo práctico de los conocimientos previamente impartidos.

Otra de las dificultades basadas en el previamente mencionado problema de la densidad de conocimientos a impartir y directamente relacionada con la necesidad de

personal docente, es el guiado necesario a la hora de implementar los bloques funcionales por parte del alumnado. Aunque los ejercicios son suficientemente sencillos para ser implementados de manera autónoma por el alumno, la premura por su finalización hace obligatorio cierto guiado en el desarrollo de los mismos. Por otro lado, existen una gran parte de ejercicios propuestos que están relacionados entre sí y por tanto todos ellos deben seguir una metodología similar para el correcto funcionamiento del conjunto. Por lo tanto, aunque puede ser inicialmente recomendable un desarrollo absolutamente autónomo por parte del alumno, se recomienda un guiado por parte del profesorado para evitar retrasos que no permitan impartir todos los contenidos del curso.

Considerando estas dos premisas y teniendo en cuenta la experiencia previa llevada a cabo con la impartición del curso, se recomienda la presencia de al menos un profesor por cada diez alumnos en las sesiones de teoría, mientras que es aconsejable al menos tres en las sesiones prácticas, en la que los alumnos desarrollan los bloques funcionales en código VHDL.

Con respecto al equipamiento necesario para la ejecución del curso, así como el desarrollo de los prototipos de CPC para la validación experimental de los bloques funcionales autónomamente desarrollados por los alumnos, es posible que sea demasiado costoso si su adquisición es únicamente para la implantación del mismo. No obstante, el equipamiento necesario es de uso habitual en un laboratorio de electrónica y puede ser reaprovechado para otras labores en los momentos en los que no se imparta el curso. Por otro lado, el desarrollo del prototipo de un CPC debería ser sencillo para el personal docente con conocimientos de electrónica de potencia y la realización de varios prototipos idénticos no es demasiado costoso. Como se ha comentado previamente se recomienda la utilización de un puesto de trabajo para, como máximo, dos alumnos, por lo que para un curso con diez participantes serían necesarios, al menos, cinco prototipos de CPC, FPGAs, osciloscopios y fuentes de alimentación.

Por último, el alumno debe tener la capacidad de utilizar el software de simulación adecuado para poder realizar las tareas y obtener el máximo beneficio posible del curso. Tiene que ser entonces la organización del curso la que facilite las herramientas. Si bien es cierto, hoy en día existe una gran cantidad de software libre y/o gratuito. Desafortunadamente, en el caso del control digital y sobre todo de las herramientas que se usan tanto para programar como para simular, no existen este tipo de alternativas. En algunos casos, es posible que el desarrollador facilite licencias gratuitas (generalmente orientadas a estudiantes) pero con un cierto grado de limitación de uso. Este sería el caso de las licencias de PSIM [10] o Modelsim [11]. Por separado, no habría ningún problema para los requisitos del curso. Sin embargo, en el caso de realizar la co-simulación disponible a través de uno de los módulos de PSIM (Modcoupler), sería necesario comprar las licencias. Este es el motivo, por el cual se dedica muy poco tiempo a la co-simulación en el curso (aun considerándolo muy interesante), ya que estas licencias tienen un coste excesivo para un curso de estas características. Independientemente de lo anterior, se considera importante explicar esta co-simulación a los alumnos, ya que les puede ayudar en su futuro laboral el tener

una idea de que este tipo de herramientas existen, para simular un CPC y un control VHDL.

En el caso de las licencias usadas para la programación de las FPGAs, existe la alternativa de utilizar la licencia gratuita orientada a estudiantes, pero todas las funciones relacionadas con los *IP cores* no están disponibles y son fundamentales para realizar muchas de las tareas (i.e. generar un reloj de mayor frecuencia al incluido en la placa mediante un multiplicador o un PLL). En la actualidad, Digilent facilita la compra de la licencia del software por la compra de cada FPGA añadiendo un precio casi simbólico. Esto facilita poder tener todas las FPGA disponibles para todos los alumnos del curso y es uno de los aspectos más importantes que hace que la práctica sea eficiente para el aprendizaje del alumno.

IV. CONCLUSIONES

Este artículo describe la metodología seguida para la impartición de un curso de control digital orientado al control de CPC. Se describen los contenidos propuestos en el curso así como la metodología de ABP llevada a cabo para la impartición del mismo.

El uso del control digital en la electrónica de potencia se encuentra cada vez más extendido y por tanto, tener unos conocimientos, aunque sean básicos, se está convirtiendo en fundamental. Además, se considera que el control digital facilita en gran medida el prototipado rápido de CPC y la validación de nuevas técnicas de control o nuevas topologías de CPC.

La metodología propuesta ha cosechado resultados satisfactorios, aunque tiene importantes exigencias con respecto a la dedicación docente, la planificación temporal y los recursos necesarios.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía a través de los proyectos DPI2013-47176-C2-2-R y MINECO-15-DPI2014-56358-JIN, y el Gobierno del Principado de Asturias a través del proyecto FC-15-GRUPIN14-143 y los fondos FEDER.

REFERENCIAS

- [1] Ángel de Castro; Tesis Doctoral: Aplicación del control digital basado en hardware específico para convertidores de potencia conmutados. Universidad Politécnica de Madrid, 2003.
- [2] A. Prodic, D. Maksimovic, "Digital PWM controller and current estimator for a low-power switching converter". Computers in power electronics (COMPEL), Julio 2000, p. 123-128.
- [3] Wu, A.M.; Xiao, J.; Markovic, D.; Sanders, S.R., "Digital PWM control: application in voltage regulation modules". 30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC), vol.1, p. 77-83. Agosto 1999.
- [4] Jesús Alcocer, Silvia Ruíz y Miguel Valero-García, "Evaluación de la implantación de aprendizaje basado en proyectos en la EPSC (2002-2003)". XI Congreso Universitario de Innovación Educativa en Enseñanzas Técnicas, julio 2003
- [5] Miguel Valero-García, "Las dificultades que tienes cuando haces PBL". La Educación Superior hacia la Convergencia Europea: Modelos basados en el aprendizaje (capítulo 8). Universidad de Mondragón.
- [6] <http://www.spcontroltechnologies.com/en/spcard/>
- [7] <http://www.xilinx.com/>
- [8] Serafín Alfonso Pérez López, Enrique Soto Campos, Santiago Fernández Gómez, "Diseño de sistemas digitales con VHDL", Editorial Paraninfo, 2002.
- [9] <http://store.digilentinc.com/>
- [10] <http://powersimtech.com/products/psim/>
- [11] https://www.mentor.com/company/higher_ed/modelsim-student-edition