

PLATAFORMA PARA EL AUTOAPRENDIZAJE DE LAS FPGA Y SUS APLICACIONES

C. QUINTÁNS^{1,2}, J.M. LAGO¹, L.M. MENÉNDEZ^{2,3} Y E. MANDADO^{1,2}

¹*Departamento de Tecnología Electrónica. Universidad de Vigo. España.*

²*Instituto de Electrónica Aplicada. Universidad de Vigo. España.*

³*Técnicas Formativas s.l. Vigo. España*

En esta comunicación se presenta una plataforma electrónica que puede formar parte de un sistema integrado que facilite la enseñanza/aprendizaje de las FPGA y del diseño de sistemas electrónicos basados en ellas. Consiste en un hardware de bajo coste que posee un microcontrolador USB y una FPGA y que además se puede combinar con un computador personal en el que se ejecute un programa en Visual C o Basic. El microcontrolador USB implementa una interfaz USB-JTAG que conecta el software y el hardware. La plataforma posee un modo de funcionamiento en el que se reconfigura el hardware y un modo de funcionamiento en el que se establece un canal de comunicación para la transferencia de datos entre el hardware y el software.

1. Introducción

Este trabajo se enmarca en el ámbito del desarrollo de sistemas electrónicos orientados a facilitar el aprendizaje de las FPGA y sus aplicaciones [1,2], especialmente aquellas en las que se combinan un sistema físico (hardware) con un programa (software) que se ejecuta en un computador personal.

Un sistema digital configurable se caracteriza porque su funcionalidad se puede modificar cambiando las conexiones entre los recursos lógicos que forman parte de él. Por ello las FPGA se utilizan cada vez más para desarrollar sistemas electrónicos complejos de control y de comunicaciones, que necesitan cambios de la función que realizan, no solo en la fase de diseño sino también durante la vida útil.

Las FPGA tienen decenas de miles de puertas y biestables, y sus elementos de configuración son, en muchas de ellas, biestables asociados para constituir una memoria RAM. Por lo tanto, las FPGA son volátiles, tienen una gran cantidad de terminales de entrada-salida (del orden de 44 a 1000) y están asociadas a herramientas de diseño de alto nivel que facilitan la implementación de la funcionalidad deseada. Actualmente las FPGA permiten la implementación de sistemas muy complejos, cuyo hardware se adapta fácilmente para optimizar la realización de diferentes funciones a partir de módulos prediseñados y verificados.

En la figura 1 se muestra el diagrama de bloques del sistema electrónico complejo reconfigurable desarrollado [3]. Este sistema está formado por un computador personal, y una placa, denominada FPGA-USB2 que contiene un circuito reconfigurable de tipo FPGA [4] y un microcontrolador USB [5]. El computador y la placa están unidos a través de una interfaz USB-JTAG. El usuario da órdenes al computador a través de una interfaz gráfica y el programa reconfigura los circuitos para que se adapten a las especificaciones del sistema concreto que se quiere diseñar.

Para la placa se ha desarrollado un conjunto de prácticas de nivel medio-avanzado de diseño de sistemas electrónicos basados en FPGA. Para realizar las prácticas se deben tener conocimientos de Electrónica Digital (multiplexores, decodificadores, contadores, memorias, etc.) y nociones básicas del lenguaje VHDL.

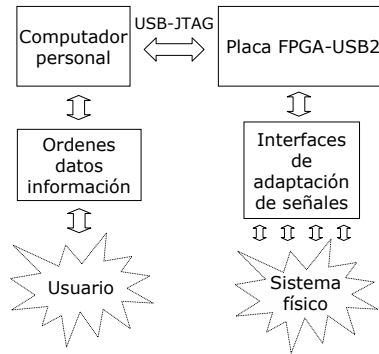


Figura 1. Sistema electrónico basado en un computador personal y en un circuito reconfigurable.

El sistema a diseñar en cada práctica se describe mediante un esquema, un diagrama de flujo o un programa en el lenguaje VHDL para que el alumno se familiarice con ellos a lo largo de la realización de las mismas. Por ser Altera el fabricante de la FPGA de la placa FPGA-USB2, para diseñar los sistemas se utiliza la herramienta de libre distribución *Quartus II Web Edition* que es fácil de aprender por los usuarios.

Los objetivos que se quieren alcanzar utilizando el sistema desarrollado son los siguientes:

- Familiarizar al usuario con las características del hardware reconfigurable y su utilización en el desarrollo de sistemas electrónicos.
- Facilitar el aprendizaje de la herramienta *Quartus II Web Edition*.
- Facilitar el aprendizaje de los métodos de diseño de sistemas electrónicos digitales basados en FPGA's.
- Utilizar el lenguaje VHDL para diseñar sistemas complejos.

El sistema físico (hardware FPGA-USB2), el panel de control del mismo y las prácticas presentadas en este trabajo se complementan con un sistema de instrumentación virtual que facilita la verificación del sistema desarrollado en cada práctica [6]. Este sistema de instrumentación se implementa utilizando parte de los recursos de la FPGA y en el caso de la medida de señales analógicas se complementa con una placa externa que se conecta a uno de los conectores de expansión de la placa FPGA-USB2. El sistema de instrumentación se combina con un programa que se ejecuta en el ordenador personal para implementar las interfaces de los instrumentos virtuales. Los instrumentos virtuales disponibles son un osciloscopio digital de 2 canales, un analizador lógico de 16 canales y un generador de funciones de 2 canales.

3. Descripción del sistema

En la figura 2 se representa el diagrama de bloques de la placa FPGA-USB2 que posee un microcontrolador USB para llevar a cabo la interfaz de comunicaciones entre el computador personal y la FPGA. Dicha placa tiene un modo de funcionamiento de programación y otro de comunicación. En el modo de programación el microcontrolador se comunica con el programa ejecutado en el computador personal a través del bus USB y con la FPGA a través de una interfaz JTAG para llevar a cabo su configuración. En el modo de comunicación se establece un canal de comunicaciones de alta velocidad entre la FPGA y el computador personal para realizar la transferencia de datos generados por el sistema reconfigurable.

Las funciones del programa del computador que controlan el modo de programación están implementadas mediante una biblioteca de funciones de enlace dinámico (*DLL*). Esto hace que el usuario no tenga que diseñar funciones de bajo nivel, cuando crea el programa del computador que configura la FPGA, para llevar a cabo el diseño del sistema específico que tiene que desarrollar.

El sistema dispone también de un módulo de comunicación que configura una parte de la FPGA para que lleve a cabo las tareas de comunicación antes citadas. Mediante las funciones de bajo nivel y el módulo de comunicación, el usuario utiliza el bus USB de forma transparente, para lo cual dispone de cuatro buzones de 512 bytes, dos de entrada y dos de salida. A la placa FPGA-USB2 se le pueden añadir placas de expansión con periféricos específicos.

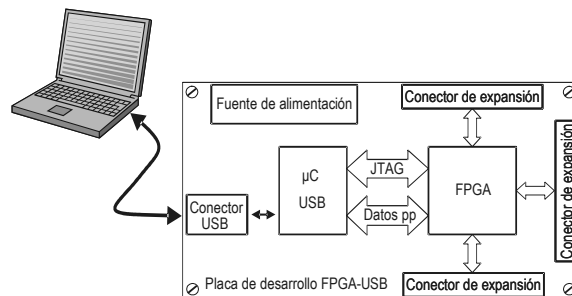


Figura 2. Diagrama de bloques del hardware de la plataforma reconfigurable.

En los siguientes apartados se describen con mayor detalle las partes que conforman la plataforma que se presenta.

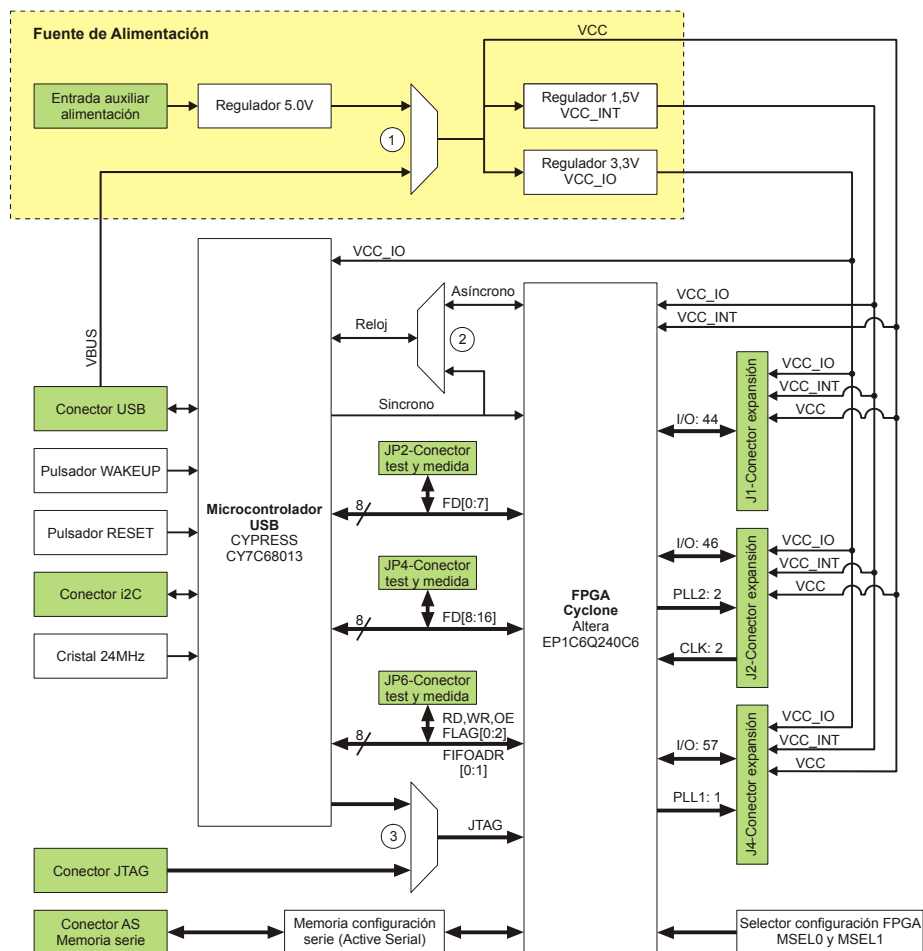


Figura 3. Diagrama de bloques del hardware de la tarjeta FPGA-USB2.

3.1. Descripción de la placa FPGA-USB2

En la figura 3 se muestra el diagrama de bloques detallado de la placa FPGA-USB2 que está formada por los siguientes elementos:

- Un microcontrolador USB, implementado con el circuito integrado de la familia FX2 de Cypress [5], en el que se implementa la interfaz USB-JTAG.
- Una memoria E2PROM en la que se graba el programa de configuración de la FPGA. Esta memoria permite que la FPGA se pueda configurar sin estar conectada al computador (*stand-alone operation*).
- Una FPGA en la que se configura el sistema objeto del diseño y los módulos de comunicación e instrumentación prediseñados.

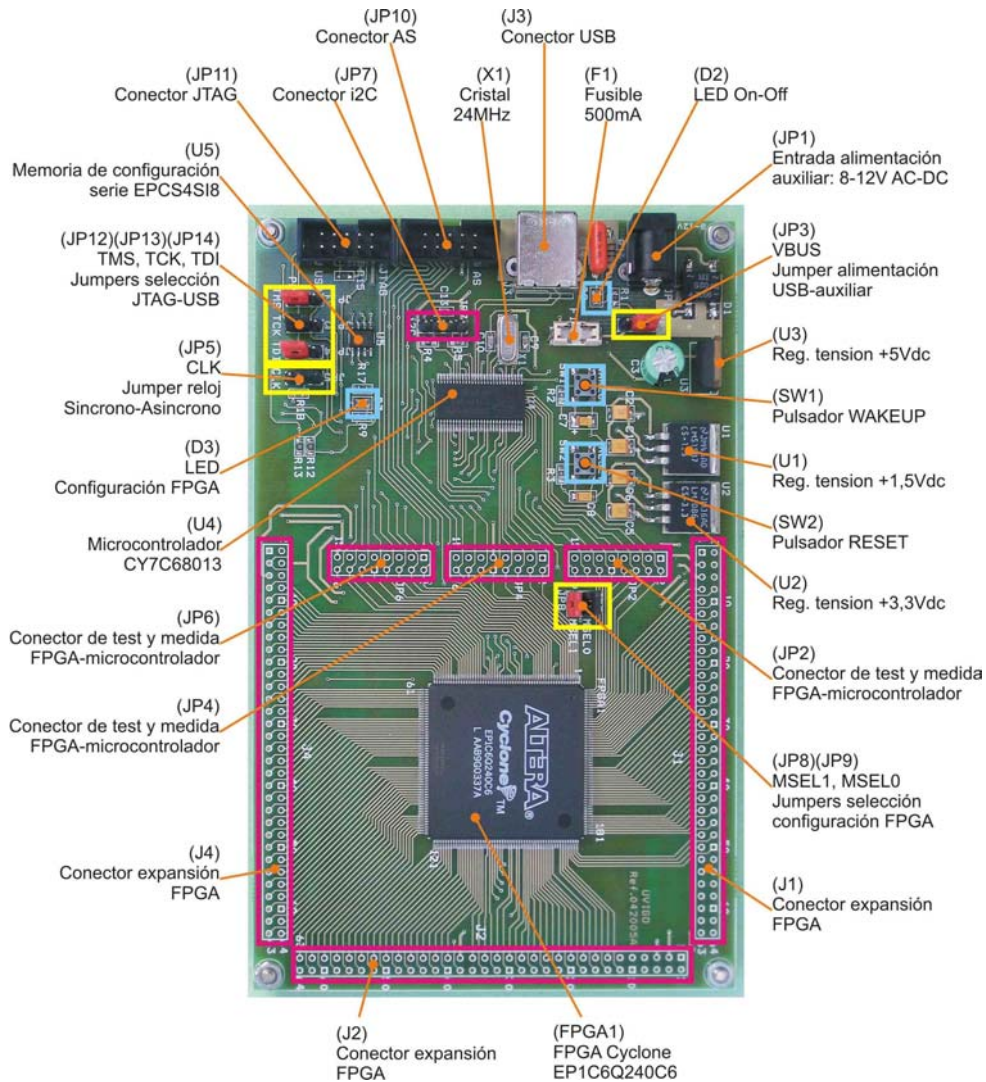


Figura 4. Fotografía y componentes de la tarjeta FPGA-USB2.

En la figura 4 se presenta una fotografía de la tarjeta FPGA-USB2 que se puede alimentar de dos formas distintas:

- A partir de la tensión de +5 Vdc que tiene el bus USB cuando la aplicación es de bajo consumo.
- Mediante un alimentador universal cuando la aplicación tiene un consumo mayor de 500 mA. Para lo cual la placa dispone de una entrada de alimentación externa (JP1).

Para conectarse con el computador personal, la placa tiene, además de la conexión USB2 (J3), de dos conectores (JP10 y JP11) para la interfaz JTAG. Mediante el conector JP10 se programa la E2PROM y mediante el conector JP11 se programa la FPGA.

La FPGA que contiene la tarjeta es el modelo Cyclone EP1C6Q240C6 de Altera que posee los siguientes recursos [2]:

- Un total de 5980 elementos lógicos.
- 20 bloques de memoria RAM de 128x36 bits que se pueden combinar en diferentes configuraciones de las que es especialmente interesante la configuración como memoria FIFO de doble puerto con una velocidad de acceso máxima es de 200 MHz.
- Dos bucles de fase enclavada (PLL) de una frecuencia máxima de trabajo de 400 MHz que se pueden configurar para sintetizar señales de distintas frecuencias.
- Un total de 185 terminales de E/S de los que 151 están accesibles en los conectores J1, J2 y J4 para facilitar la conexión de las placas de expansión y los periféricos utilizados en las prácticas.

3.2. Software de control de la tarjeta FPGA-USB2.0

La plataforma de desarrollo de sistemas electrónicos digitales complejos tiene un programa que facilita su aplicación práctica. Este programa esta constituido por una biblioteca de bajo nivel con las funciones básicas que controlan la placa FPGA-USB2 en sus dos modos de funcionamiento (programación del μ C, configuración de la FPGA, manejo de los buzones (*buffers*) de comunicación, etc.). Estas funciones están diseñadas para servir de base de los programas que realice el usuario en Visual Basic y C++.

Además, el sistema dispone de una interfaz de usuario que permite controlar el hardware de forma manual (Fig. 5) y llevar a cabo un test de la comunicación (Fig. 6).

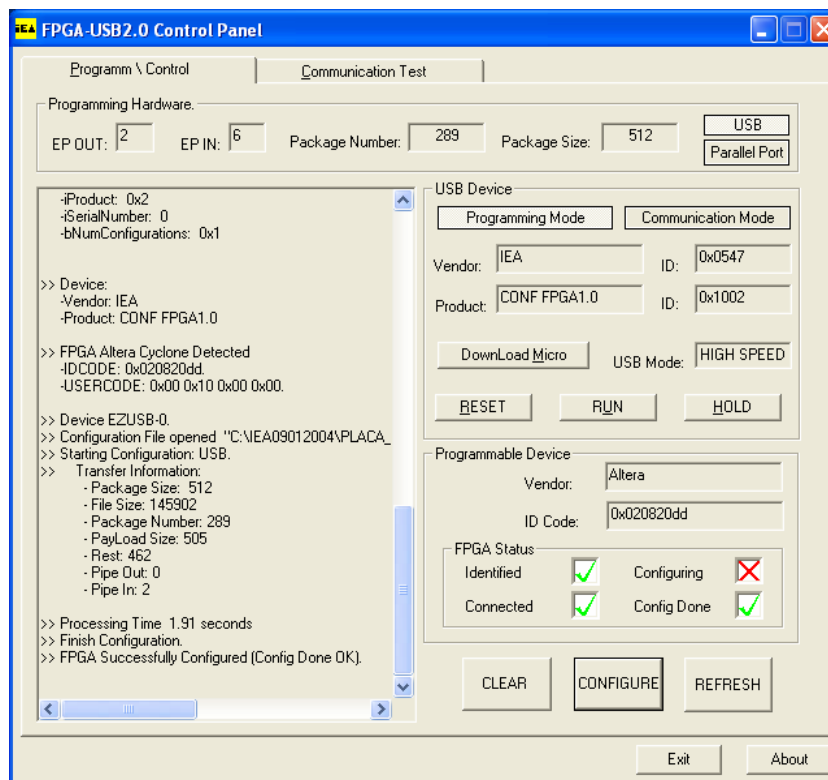


Figura 5. Panel de control de la tarjeta FPGA-USB2 en el modo programación/control.

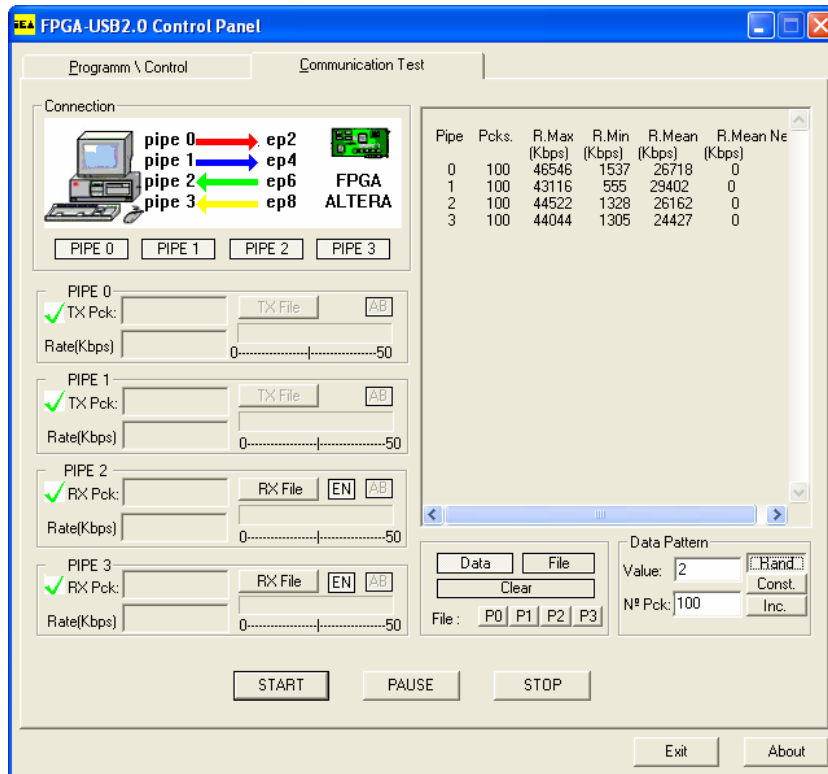


Figura 6. Panel de control de la tarjeta FPGA-USB2 en el modo test de comunicación.

4. Descripción de las prácticas

Para la realización de las prácticas se utiliza el siguiente conjunto de periféricos que complementan a la tarjeta FPGA-USB2:

- *Elementos de visualización*
 - Visualizador de matriz de puntos de cristal líquido (LCD) de 16 x 2 caracteres.
 - Matriz de diodos luminiscentes (LED).
 - Visualizador (*Display*) de 7 segmentos.
- *Dispositivos de entrada*
 - Teclado con interfaz de tipo PS2.
 - Teclado matricial de 16 teclas (4x4).
 - Un conjunto de pulsadores independientes de tipo lenteja.
 - Un conjunto de micro-interruptores.
- *Elementos convertidores*
 - Circuitos adaptadores de niveles lógicos (HCT).
 - Dispositivos básicos para la construcción de convertidores D/A y A/D.

Estos periféricos son montados por el usuario en una placa de prototipos (*protoboard*). De esta forma el usuario se familiariza con el manejo de periféricos y su acoplamiento al sistema basado en una FPGA.

Las prácticas están organizadas en tres niveles de complejidad creciente. En el primer nivel se consiguen resultados prácticos visibles, lo cual motiva a los alumnos para realizar el esfuerzo necesario para diseñar sistemas electrónicos complejos en el segundo y tercer niveles. Las prácticas aumentan paulatinamente en complejidad lo que contribuye a justificar la utilización de una FPGA de gran capacidad de recursos lógicos.

A continuación se indican las prácticas que se realizan en cada nivel. Cada práctica se divide en tres apartados:

- Planteamiento del problema.
- Descripción de los elementos que intervienen en la solución.
- Desarrollo y montaje del sistema.

Nivel básico

En este nivel se realizan prácticas sencillas para familiarizarse con la herramienta de desarrollo y con la placa FPGA-USB2. Se diseñan circuitos de control de periféricos (interfaces de teclado, de visualizador de 7 segmentos, etc.) y su módulos de programación asociados. De esta forma los usuarios crean su propia biblioteca de recursos que se reutilizan en las prácticas de nivel medio y avanzado. Las prácticas de este nivel son:

- Presentación del software Quartus II Web Edition.
- Sistema digital de exploración de un teclado matricial de 16 teclas [7].
- Controlador de un teclado PS2, conversión a ASCII 8 bits [8].
- Sistema digital de control del visualizador de cristal líquido (LCD).
- Implementación de memorias de tipo PILA y de tipo COLA circulares [9].

Nivel medio

En primer lugar se realiza una calculadora básica para consolidar los conocimientos adquiridos en el nivel básico. Seguidamente se desarrollan los siguientes sistemas analógico-digitales y de comunicaciones:

- Sistema de comunicación serie con codificación Manchester y detección de errores CRC.
- Sistema de control de un convertidor D/A.
- Sistema de control de un convertidor A/D de aproximaciones sucesivas.

Nivel avanzado

En primer lugar se realiza un sistema de alarma para consolidar los conocimientos adquiridos en el nivel medio. Seguidamente se desarrollan los siguientes sistemas de control de periféricos avanzados y de procesamiento de señal:

- Interfaz de control de una memoria EEPROM serie.
- Realización de un filtro FIR.
- Realización de un sistema de control discreto.

5. Resultados

Se ha desarrollado un prototipo final industrializable tanto del sistema físico (*hardware*) como de los recursos de programación. La placa de desarrollo tiene un tiempo de reconfiguración reducido (2 s) y una velocidad media de transferencia de datos entre el computador personal y la FPGA elevada (8 MBytes/s). El sistema se ha utilizado para el diseño de sistemas basados en FPGA mediante un conjunto de prácticas organizado en tres niveles. La plataforma presentada, complementada con la instrumentación virtual, constituye un verdadero sistema de altas prestaciones y bajo coste para el aprendizaje del diseño de los sistemas electrónicos modernos.

El conjunto de prácticas propuesto constituye un curso que proporciona al usuario una visión realista de los sistemas electrónicos modernos y de cómo se implementan.

7. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Xunta de Galicia (Gobierno Autónomo de Galicia) la financiación prestada para la realización de este trabajo. También agradecen la colaboración de la empresa SISTEMAS ELECTRÓNICOS JOBE S.L. que ha prestado su apoyo para la fabricación de la placa FPGA-USB2.

Referencias

- [1] E. Mandado, M. J. Moure, C. Quintáns, M.D. Valdés, “Sistema Integrado para la Enseñanza de los Circuitos Digitales Configurables y sus Aplicaciones,” *TAAE VI, Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica*. Valencia (España), 14-16 de Julio de 2004.
- [2] C. Quintans, M. D. Valdes, M. J. Moure, L. Fernandez-Ferreira, E. Mandado, “Digital Electronics Learning System Based on FPGA,” in *Proc. IEEE Frontiers in Education Conference*, Indianápolis, 19-22 de Octubre de 2005.
- [3] Quintáns C., Valdés M.D., Moure M.J., Mandado E. *Sistema de desarrollo de aplicaciones electrónicas basado en dispositivos lógicos configurables y en el bus serie universal*. Patente española, N° solicitud: P200301238, N° publicación: 22202223. Fecha concesión: 16 de Septiembre de 2005.
- [4] Technology Center, Altera Corp., CA. [Online]. Disponible: <http://www.altera.com/technology>.
- [5] CY7C68013 EZ-USB FX2 USB Microcontroller High-Speed USB Peripheral Controller. Cypress Semiconductors Corp., CA. [Online]. Disponible: <http://www.cypress.com>.
- [6] C. Quintáns, M.J. Moure, R. García-Valladares, M.D. Valdés, E. Mandado, “A Virtual Instrumentation Laboratory Based on a Reconfigurable Coprocessor,” in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 55, nº 2, pp. 635-645, Abril 2006.
- [7] E. Mandado, L.J Álvarez, M.D Valdés. *Dispositivos lógicos programables y sus aplicaciones*. Thomson Editores Spain – Paraninfo. Madrid 2002.
- [8] L.J Álvarez. *Diseño de Aplicaciones mediante PLDs y FPGAs*. Tórculo Edicions. Santiago de Compostela. 2001.
- [9] E. Mandado. *Sistemas Electrónicos Digitales*. 7ª Edición. Editorial Marcombo. 1991.