

ENSEÑANZA DE SISTEMAS DIGITALES USANDO LENGUAJES DE DESCRIPCIÓN DE HARDWARE

MSE. JORGE HERNANDO RAMÓN SUÁREZ

Profesor Titular Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

Grupo de Investigación CEMOS - LSD

Universidad Industrial de Santander

jramons@uis.edu.co

JUAN CARLOS MARTÍNEZ SANTOS

Grupo de Investigación CEMOS - LSD

Universidad Industrial de Santander

jcmartin@uis.edu.co

RESUMEN

El presente artículo analiza la conveniencia de utilizar los lenguajes de descripción de hardware en la enseñanza de la materia de Sistemas Digitales que aparece en los planes de estudio de Ingenierías Eléctrica, Ingeniería Electrónica e Ingeniería de Sistemas.

Para lograr lo anterior se debe iniciar el estudio de los conceptos de lenguajes de descripción de hardware (HDL) y dispositivos lógicos programables (PLD) de tal modo que pueda llegar a tecnologías más avanzadas como los FPGA, CPLD y el lenguaje de descripción estandarizado VHDL.

También se quiere destacar que dentro del juego de herramientas que debe tener el ingeniero electrónico moderno, la informática, y en particular el software, juega un papel muy importante. En un principio los resultados han sido alentadores, representados en una actitud más receptiva por parte de los estudiantes, reflejada en la elaboración de aplicaciones específicas de mediana complejidad empleando en ellas la GAL ATF22V10 y desarrollando el diseño con ayuda del lenguaje WinCUPL.

PALABRAS CLAVES: Sistema digital, lenguaje de descripción de hardware (HDL), dispositivos lógicos programables (PLD), compilador universal de lógica programable (CUPL), lógica de arreglos genéricos (GAL).

INTRODUCCIÓN

Cuando un estudiante va a construir un sistema digital, debe tener conceptos claros sobre hardware, software y la relación entre ellos.

Una buena forma de comprender las capacidades y limitaciones de un sistema digital es diseñarlo, y hacer que

ese diseño se haga realidad en un salón de clases por medio de un prototipo, lo cual hace el aprendizaje más atractivo.

Para la realización de los prototipos, se han considerado dos herramientas: una de ellas son los dispositivos lógicos programables (PLD) y la segunda son las herramientas de diseño asistido por computador, que con el empleo de un lenguaje de descripción de hardware (HDL) permiten el diseño, la validación y la implementación de un sistema digital.

La presente propuesta busca incorporar nuevos conceptos, con sus prácticas, en el curso de Sistemas Digitales, iniciando con un estudio general de las familias de los circuitos integrados de aplicación específica (ASIC) [1] y profundizando en los dispositivos con tecnología GAL [2], los cuales permiten, gracias a su arquitectura, emular los principales PLD disponibles en el mercado. Además, se presenta el lenguaje CUPL como herramienta de diseño y simulación de sistemas digitales.

El artículo está organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se describe el método tradicional en la enseñanza de los Sistemas Digitales. En la sección 3 se justifica el enfoque propuesto. La sección 4 explora la estructura del curso y el método de enseñanza empleado, considerando la fusión de la técnica de diseño de sistemas digitales con PLD y usando lenguajes VHDL. En la sección 5 se examinan las herramientas de software y hardware disponibles para el desarrollo de esta propuesta. En la sección 6 se presenta un resultado preliminar del curso. Finalmente en las secciones 7 y 8 se presentan el estado actual y el futuro del trabajo, así como algunas conclusiones.

MÉTODO CONVENCIONAL

El estudio de los sistemas digitales empieza en el estudio de los circuitos lógicos y llega hasta los sistemas basados en procesadores.

El estudio de los Circuitos Lógicos permite colocar las bases conceptuales de toda la materia y a su vez se divide en dos grandes temas: lógica combinacional y lógica secuencial.

En cada uno de ellos se cubren aspectos básicos del diseño; es así como en la lógica combinacional se estudian técnicas de reducción, implementación de funciones, estudio tales como codificadores y decodificadores, multiplexores y demultiplexores, sumadores, etc. En el campo de la lógica secuencial se cubren aspectos como el flip - flop, los contadores, los secuenciadores y los registros. Para descripción más detallada se pueden revisar los contenidos de las referencias [3, 4, 5, 6 y 7].

Para implementar un circuito lógico, el método clásico recurría a las compuertas lógicas básicas y a funciones de mediana complejidad materializados en circuitos integrados de las familias TTL y CMOS, teniendo que sortear los inconvenientes propios del reducido número

de funciones disponible en el mercado. El cableado de los circuitos normalmente agrega un nivel adicional de complejidad que realmente no agrega ningún valor conceptual. Con la introducción de los dispositivos lógicos programables se busca dar al estudiante una herramienta adicional para la realización de prototipos, complementada con una herramienta computacional poderosa en el campo de la simulación y verificación de resultados como son los lenguajes de descripción de hardware.

La inclusión de estas tecnologías en las nuevas ediciones de textos relacionados con el tema [3, 4, 5 y 6] y la aparición de nuevos textos [14, 15, 16 y 17] claramente muestra la tendencia tecnológica y permite sentar las bases para los nuevos desarrollos en el área de los circuitos integrados de aplicación específica (ASIC). La meta es llegar a tecnologías tales como los arreglos de compuertas programables en campo (FPGA) y los dispositivos lógicos programables complejos (CPLD), asistidos por herramientas como el lenguaje de descripción de hardware VHDL.

JUSTIFICACIÓN

La tendencia actual del diseño digital es la especialización de las funciones, es decir, el diseño de sistemas embebidos capaces de ser autónomos en el desarrollo de la función para la cual han sido diseñados.

La justificación principal de esta propuesta es seguir esta corriente, con la cual se quiere mostrar al futuro ingeniero profesional un punto de vista para el desarrollo de sistemas con nuevas tecnologías, e iniciar una línea de profundización del ingeniero electrónico, línea que puede continuar con el estudio de nuevos cursos como el Diseño de Sistemas Digitales basados en Procesadores, el Diseño de Procesadores de Aplicación Específica y codiseño Hardware/Software.

Este camino introduce al estudiante en la línea de diseño de hardware, que puede ser muy promisoria en temas de proyectos de grado enfocados en estas nuevas tecnologías, dando paso al desarrollo de trabajos de investigación a nivel de postgrado.

ESTRUCTURA DEL CURSO Y MÉTODO DE ENSEÑANZA

El primer objetivo es incluir en el curso de Sistemas Digitales el estudio de los dispositivos lógicos

programables en forma general (una clasificación muy conveniente se muestra en [1]) y posteriormente profundizar con el estudio de la matriz genérica, GAL (y la mejor forma es remitirse al fabricante [2]), seguido del estudio de los CPLD y FPGA. Es recomendable estudiar el ciclo de desarrollo de un diseño y su implementación final. Además, mostrar las ventajas del diseño asistido por computador, los simuladores y los lenguajes de descripción de hardware, profundizando en este caso en el manejo de CUPL y VHDL [8, 14 y 15].

A. Estructura del curso.

El curso está compuesto por los siguientes temas, según [7]:

- Representación digital de los datos
- Circuitos lógicos combinacionales
 - Puertas básicas, álgebra del Boole
 - Circuitos básicos de dos niveles
 - Minimización de circuitos
 - Aplicación de circuitos combinacionales
 - Circuitos combinacionales programables.
- Circuitos lógicos secuenciales
 - Flip - flop
 - Contadores
 - Secuenciadores
 - Registros
 - Memorias
 - Circuitos secuenciales programables.
- Sistemas basados en procesadores.

El curso teórico comprende 5 horas semanales y está apoyado con sus respectivas prácticas de laboratorio de 2 horas cada una. Durante del curso, los estudiantes presentan dos proyectos en los cuales se aplican los conceptos desarrollados en la materia.

B. Método de enseñanza.

El curso está basado en la teoría tradicional de los sistemas digitales, al cual se le ha incorporado el estudio detallado de los dispositivos lógicos programables tipo GAL, en especial el ATF22V10, capaz de emular los PLD tipo PAL, PLA y PEEL de capacidades similares, cubriendo tópicos como modos de configuración, potencialidades y limitaciones. Además se incorpora el empleo del lenguaje CUPL y sus módulos de simulación, captura esquemática y diseño de máquinas de estado.

El método se complementa con la puesta en marcha de una serie de prácticas encaminadas al empleo de estas herramientas, diseñando sus aplicaciones de la misma forma como se hace en el desarrollo tradicional de los sistemas digitales, es decir usando tablas de verdad, ecuaciones y diagramas de máquinas de estado.

De esta manera el estudiante al finalizar el semestre habrá obtenido la comprensión del proceso básico de diseño de un sistema digital con un nivel bueno de abstracción.

En resumen, la propuesta comprende desarrollar la materia de Sistemas Digitales, cubriendo los mismos temas, solo que se reemplaza la tecnología tradicional de implementación con circuitos integrados discretos por el uso de dispositivos lógicos programables y lenguajes de descripción de hardware.

HERRAMIENTAS

Para el desarrollo de esta propuesta se cuentan con herramientas tipo hardware y software.

A. Hardware

Se cuenta con la infraestructura física, tecnológica, así como de los elementos necesarios para la elaboración y estudio de todas los temas tratados en el curso, compuertas, codificadores, flip - flop, PLD tipo GAL, PAL, PEEL, memorias, etc. así como de los sistemas de desarrollo para CPLD y FPGA de Altera y Xilinx.

B. Software

Además de contar con la versión WinCUPL (lenguaje CUPL) de Atmel y los módulos WinSim (de simulación), Schematics (de captura esquemática) y Smcupl (diagramas de máquinas de estado) el estudiante cuenta con Circuit Maker, un programa de captura y simulación de circuitos; todos los programas están disponibles en el laboratorio de Sistemas Digitales. Para el desarrollo de aplicaciones en FPGA y CPLD se tienen los entornos de desarrollo ISE y MAX + PLUS II, de Xilinx y Altera respectivamente. Los estudiantes también pueden tener acceso a versiones de demostración facilitadas por los fabricantes [9, 10, 11 y 12].

RESULTADOS

Los resultados se ven reflejados en los trabajos de laboratorio y en los proyectos finales, en donde se implementan funciones desarrolladas en WinCUPL y montados en tarjetas de prototipo en su mayoría empleando el ATF22V10. Los proyectos son ejemplos planteados en textos como aplicación de los conceptos relativos a los sistemas digitales, entre ellos tenemos los siguientes:

- Lógica de control de un ascensor [3]
- Juego de desempates y contadores [4]
- Luces del Ford [6]
- Sistema de semáforos [3 y 6]
- Ejemplos de prueba de WinCUPL adaptados a las necesidades [7]

Y otros desarrollados por los estudiantes como:

- Manejo de un motor paso a paso de cuatro fases
- Conversor de código Binario a código Gray [17].
- Sistemas de monitoreo y seguridad.
- Multiplicadores sincrónicos [17].

El trabajo en proyectos se ha comprobado que es más motivador para el estudiante, y la tecnología empleada permite acometer aplicaciones de un relativo alto nivel de complejidad.

ESTADO ACTUAL Y EVOLUCIÓN

Actualmente se está impartiendo el curso y se está considerando la aplicación del diseño de sistemas digitales con otras tecnologías, para lo cual se formó un grupo especial de trabajo con estudiantes de la materia con el objetivo de estudiar VHDL y probar sus modelos en los dispositivos programables de *Xilinx*.

Por otro lado se diseñó un sistema de desarrollo para los CPLD de la familia XC4000+ de *Xilinx* [13].

Se está desarrollando un proyecto de investigación el cual emplea VHDL como lenguaje de descripción para el diseño de un procesador de propósito específico y su desempeño se evalúa en una FPGA de la familia FLEX 10K de Altera [11].

Por último, se está trabajando en el desarrollo de un analizador lógico para dispositivos programables de *Xilinx*, aprovechando las posibilidades que brinda el protocolo JTAG.

CONCLUSIONES

Se ha podido integrar el estudio de los PLD y de CUPL en la materia de Sistemas Digitales, lográndose la implementación de funciones combinacionales y secuenciales de buena calidad por parte de los estudiantes. Se ha probado que VHDL puede ser impartido en el curso actual de Sistemas Digitales, y de continuar con esta tendencia se puede lograr un cambio sustancial en la forma de cómo plantear una solución a un problema real.

Con estas herramientas, el estudiante puede empezar una nueva línea de estudios a partir de las tecnologías mostradas en el curso, el cual ha mostrado ventajas como el incremento del interés de los estudiantes en los temas relacionados con PLD y HDL, el empleo de elementos comerciales en el desarrollo de prototipos y la consolidación de los conceptos desde el punto de vista teórico - práctico enfocado a la solución de problemas. Los proyectos de grado, finalizados y en desarrollo, muestran la potencialidad de las nuevas tecnologías y sus ventajas ante el modelo convencional de enseñanza de los Sistemas Digitales.

Se recomienda continuar el estudio de estos temas de modo más completo e introducir elementos de diseño con FPGA y CPLD de la mano con lenguajes de descripción de hardware de alto nivel como VHDL. Se puede continuar esta línea con el estudio de sistemas basados en procesadores, bien sean microcontroladores o microprocesadores comerciales. Se recomienda iniciar estudios cuyo objetivo sea el desarrollo de procesadores de aplicación específica.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al patrocinio del DIF al proyecto de investigación "Prototipado de Sistemas Digitales".

REFERENCIAS

- [1] Antonio García Rozo y Mauricio Guerrero Hurtado. "Circuitos Integrados Programables, PICs". Universidad de los Andes, 1996.
- [2] Atmel Inc. Data sheet ATF22V10, 2001.
- [3] Thomas L. Floyd. "Fundamentos de Sistemas Digitales", 7ª Edición. Editorial Prentice Hall, 2000.

- [4] Ronal J. Tocci. "Sistemas Digitales, Principios y Aplicaciones", 6° Edición. Editorial Prentice Hall, 1999.
- [5] Victor P. Nelson, H. Troy Nagle, Bill D. Carroll y J. David Irwin. "Análisis y Diseño de Circuitos Lógicos Digitales". Editorial Prentice Hall, 1996.
- [6] John F. Wakerly. "Digital Design, Principles & Practices", 3° Edición actualizada. Editorial Prentice Hall, 2000.
- [7] Jorge H. Ramón S. "Sistemas Digitales: Circuitos Lógicos", Ediciones UIS, 2001.
- [8] Logical Devices. "Started Kit Manual CUPL, Programmable Silicon Compiler", 1996.
- [9] Atmel Inc. <http://www.atmel.com/>.
- [10] Protel International Limited, <http://www.circuitmaker.com/>.
- [11] Altera Inc. <http://www.altera.com/>.
- [12] Xilinx Inc. <http://www.xilinx.com/>.
- [13] Jorge Corzo y Ricardo Neira. "Diseño y Construcción de un Sistema de Desarrollo para los FPGA XC4000+ de Xilinx", proyecto de grado, Universidad Industrial de Santander, 2002.
- [14] Robert K. Dueck. "Digital Design with CPLD Applications and VHDL". Delmar Thomson Learning, 2001.
- [15] David G. Martínez, Jessica Alcalá. "VHDL El arte de programar sistemas digitales". Compañía Editorial Continental, 2002.
- [16] Daniel D. Gajski. "Principio de Diseño Digital", 2° reimpresión. Prentice Hall Iberia, 2000.
- [17] Norman Balabanian, Bradley Carlson. "Principios de Diseño Lógico Digital". Compañía Editorial Continental, 2002.

la materia electiva Diseño con Microcontroladores y Microprocesadores. Áreas de interés: diseño de sistemas lógicos digitales, arquitectura de computadoras, diseño de sistemas embebidos y diseño de prototipos.

Jorge Hernando Ramón Suárez

Ingeniero Electricista de la Universidad Industrial de Santander, MSE en Computer, Information and Control Engineering de The University of Michigan, miembro del Grupo de Investigación CEMOS - LSD de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T) y del Grupo de Estudios de Nuevas Tecnologías de Estudios (GENTE) de la UIS. Desarrolla investigaciones en lenguajes de descripción de hardware (HDL) y en Educación Virtual. Actualmente se profesor titular de la E3T y tiene a su cargo la materia Sistemas Digitales.

AUTORES

Juan Carlos Martínez Santos

Ingeniero Electrónico de la Universidad Industrial de Santander, estudiante de Maestría en Potencia Eléctrica, desarrolla su investigación en el "Uso de lenguajes de descripción de hardware (HDL) en el diseño arquitectónico de un procesador de propósito específico". Miembro del Grupo de Investigación CEMOS - LSD de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la UIS. Se ha desempeñado como Auxiliar Docente en las materias de Sistemas Digitales y Seminario de Microcontroladores, actualmente se desempeña como Auxiliar de Laboratorio de Sistemas Digitales y profesor de