

# EXPERIENCIA ACADÉMICA SOBRE INCORPORACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO BASADA EN HDL EN UNA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

*Roberto Martínez, Rosa Corti, Estela D'Agostino, Javier Belmonte, Enrique Giandoménico*

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura  
Universidad Nacional de Rosario – (FCEIA/UNR)  
Avenida Pellegrini 250, (2000) Rosario, Argentina  
email: romamar, rcorti, estelad, belmonte, giandome@fceia.unr.edu.ar

## RESUMEN

En este trabajo se describe la planificación e implementación parcial de los cambios necesarios para introducir los HDL como metodología de diseño en el área digital de una carrera de Ingeniería Electrónica. Para lograr una fluida integración de la temática con los contenidos conceptuales de las asignaturas se aprovechan, como herramientas didácticas, las ventajas de los HDL y los ambientes de diseño asociados. Se evalúa el impacto de las modificaciones llevadas adelante en dos asignaturas durante el corriente año, comparando los resultados de las evaluaciones en 2009 con las de años anteriores y encuestas de opinión a los alumnos cursantes. Finalmente, se utilizan estas mediciones para obtener conclusiones, y determinar las líneas de trabajo a futuro.

## 1. INTRODUCCION

La ingeniería electrónica, al igual que otras disciplinas de base tecnológica, produce avances acelerados incorporando una amplia gama de novedades que, a su vez, impulsan la inclusión de otras. Este proceso provoca el reemplazo de tecnologías que han quedado obsoletas, por otras de última generación. De esta manera, el ciclo de vida útil de algunos instrumentos tecnológicos puede ser muy corto. Ante la situación planteada, existe una preocupación presente en el cuerpo docente: la de seleccionar los contenidos más significativos del programa de estudio y, en algunos casos, los de mayor vigencia en el tiempo. Asimismo, los contenidos y su naturaleza, determinarán la metodología de enseñanza más apropiada.

Una aspiración siempre presente en el docente (fundamentalmente en los últimos cursos), respecto de la “utilidad” de los temas, es que estos tengan cierta vigencia, al menos en los primeros años de la futura actuación profesional del alumno. El plan de estudios de una carrera tecnológica, como Ingeniería Electrónica debe cumplir con dos objetivos: que el alumno aprenda los fundamentos científicos de la electrónica, pero al mismo tiempo incorpore, en su manejo, las últimas tecnologías

emergentes. Notamos también, que el abordaje de esta problemática se ve dificultada por la ausencia de estudios sobre el aspecto epistemológico de nuestra disciplina, poco se ha dicho sobre la manera en que este cuerpo de conocimientos va construyendo sus categorías y sus métodos. Hay que tener presente que, a su vez, la estructuración de los contenidos conlleva en sí mismo implicaciones metodológicas. En particular, el diseño de los sistemas digitales, desde la perspectiva disciplinar, es decir, conjunto de conocimientos estructurados para su enseñanza, debe ser acompañada por un adecuado marco pedagógico que la facilite. La teoría constructivista del proceso de enseñanza aprendizaje, se basa en que la realidad que creemos conocer es activamente construida por el sujeto cognoscente, el alumno. Llegar a conocer, en el constructivismo, es un proceso adaptativo que organiza el mundo experiencial del sujeto. Muchos autores han realizado aportes en esta línea de pensamiento, entre ellos, Ausubel [1], introduce dos conceptos claves, el de aprendizaje significativo y el de inclusores. El aprendizaje significativo resulta ser aquel por el cual las ideas expresadas simbólicamente son relacionadas en forma sustancial con lo que el alumno ya sabe, con los conocimientos previos. Es decir referenciadas con algún aspecto esencial de su estructura cognitiva. Para Ausubel, la forma más relevante del aprendizaje significativo se da cuando las nuevas ideas se relacionan subordinadamente con ideas relevantes de mayor nivel de abstracción, generalidad e inclusividad. A estos conocimientos previos, que sirven de anclaje para los nuevos conceptos, les llama inclusores. También en este modelo, Bruner [2], desde la perspectiva curricular, propone que el currículum debe organizarse de forma espiralada, es decir, trabajando periódicamente los mismos contenidos, cada vez con mayor profundidad. Esto facilita que el alumno modifique las representaciones mentales que ha venido construyendo, en un proceso continuo. Estas consideraciones se han tenido en cuenta para la planificación de los cambios que aquí se describen. El resto del trabajo se organiza de la siguiente forma: en la sección 2 se describe la situación actual del Área digital, la sección 3 presenta las modificaciones propuestas cuya implementación se analiza

en la sección 4. Finalmente, la sección 5 enumera las conclusiones alcanzadas y plantea las líneas de trabajo futuro.

## 2. SITUACIÓN ACTUAL DEL ÁREA DIGITAL

La vertiginosa evolución de la electrónica digital, con las herramientas y tecnologías asociadas han revolucionado la manera de analizar, diseñar y sintetizar los sistemas digitales. Los lenguajes de descripción de hardware (HDL) junto a los ambientes de apoyo al diseño electrónico (EDA) incorporan la metodología de diseño Top-Down y como plantean los autores en [3], son las fuerzas impulsoras del desarrollo de la microelectrónica.

En este contexto, coincidimos con lo que se plantea en [4] respecto de que la enseñanza de los HDL orientados al diseño, son una herramienta de calidad para el aprendizaje de los sistemas digitales. Asimismo, la disponibilidad de tarjetas de desarrollo en base a FPGA, facilitadas al ámbito académico por las principales empresas proveedoras de esta tecnología (Xilinx, Altera) [5], [6], vía programas universitarios, han permitido encarar un proceso enseñanza-aprendizaje basado en proyectos (Project Based Learning – PLB) y cuya aplicación y potencialidades en la enseñanza de la disciplina que nos ocupa, han sido reportados en varios trabajos [7], [8], [9].

En la carrera de Ingeniería Electrónica de la FCEIA/UNR el Área Digital está integrada por tres asignaturas obligatorias, Digital I, II y III y varias asignaturas optativas cuyas currículas pueden consultarse en [10]. La metodología de diseño basada en HDL, se trata únicamente en una asignatura electiva que, debido a su carácter, cursan sólo una parte de los alumnos. Sin embargo, considerando la importancia de la temática se evaluó que era necesario incorporarla en asignaturas obligatorias para que constituyera parte de la formación integral de los futuros ingenieros.

## 3. MODIFICACIONES

El objetivo de las modificaciones aquí expuestas, fue la incorporación de la metodología de diseño basada en HDL en las asignaturas obligatorias del área digital de la carrera de Ingeniería Electrónica. Para lograrlo, se tomaron como base los cambios consensuados con los docentes que vienen introduciéndose en la carrera desde 2001, y que se detallan en [11].

La tarea se planificó integrando la temática de interés con los conceptos tratados en cada una de las materias, para aprovechar la potencialidad de los HDL como herramientas didácticas [12]. La planificación tuvo en

cuenta los contenidos curriculares de cada asignatura, y la secuencialidad adecuada para la enseñanza de los nuevos conocimientos. Los temas se distribuyeron de la siguiente forma:

Digital I: Se incorpora una introducción al VHDL, unidades de diseño, descripción de sistemas combinacionales, conceptos básicos de sistemas secuenciales y descripción de una red de Petri haciendo uso del método de traducción directa descrito en [13].

Digital II: Se profundiza la descripción VHDL de sistemas combinacionales y secuenciales iniciado en Digital I, incorporando otros bloques estándar a nivel RTL analizando su personalización. Utilizando la metodología Top-Down se integran en un sistema de complejidad media las descripciones con esquemáticos y VHDL.

Digital III: Se hace énfasis en los distintos tipos de descripción de Máquinas de Estado Finito (MEF) y su aplicación en el modelo Control-Data Path. Además se ha planificado trabajar con el estilo de descripción estructural, el manejo de bibliotecas y re-utilización de módulos relacionándolos con la arquitectura de procesadores e interconexión de periféricos. Estas modificaciones se implementarán en el primer semestre de 2010.

## 4. IMPLEMENTACIÓN DE LOS CAMBIOS

Las modificaciones se implementaron en el curso del año 2009. Durante el primer semestre se trabajó en Digital I, y considerando los resultados alcanzados se avanzó en el segundo semestre con las modificaciones en Digital II.

### 4.1. Digital I

La asignatura Digital I es la primera materia que trata sobre los sistemas digitales. El programa está estructurado de manera tal que en un comienzo se estudian los sistemas combinacionales y sus distintos estilos de descripción y síntesis. Posteriormente se aborda el diseño de sistemas secuenciales, se da el marco teórico general de su modelización (representación Mealy y Moore) y se utilizan las Redes de Petri para el modelado de sistemas secuenciales de baja y media complejidad. La resolución de problemas está orientada a los sistemas secuenciales de características industriales, caracterizados por un número importante de entradas, fuertemente no especificados y con evoluciones paralelas o uso de recursos compartidos, sistemas estos donde las Redes de Petri se muestran muy eficientes en su modelización. Finalmente, se aborda la implementación hardware a través de la síntesis cableada (puertas, flip flop y PROM) y programada (PLC). Los alumnos realizan trabajos prácticos en laboratorio sobre

**Tabla 1.** Resultados de la evaluación del tema VHDL en Digital I

	48	Nota ( 0 a 100 puntos)		
		80 o más	Entre 79 y 60	Menos de 60
No realizaron Lab VHDL	48	19	6	23
Realizaron Lab VHDL	14	11	2	1
Total	62	30	8	24
		Cantidad de alumnos		

PLC, donde implementan un sistema digital de baja complejidad modelado con una Red de Petri.

VHDL se introdujo como una representación más del comportamiento de los módulos combinacionales elementales. Es decir, a la tabla de verdad y a la expresión booleana, que modela un módulo, se le agregó una sentencia VHDL en estilo flujo de datos. Desde luego, a esta altura del desarrollo no se podía profundizar en temas del lenguaje tales como tipos de datos o estilos de descripción. Cuando fue el momento de tratar los circuitos combinacionales, donde se deben interconectar varias compuertas para formar el circuito total, se incorporó el concepto de entidad y arquitectura. Posteriormente, se introdujo el concepto de descripción secuencial de un elemento concurrente, a través de la sentencia *process*. La modelización de un flip-flop y un contador resultó adecuada para ejemplificar la descripción algorítmica en VHDL. En la última fase, una vez desarrollado el tema de redes de Petri, a las implementaciones tradicionales (cableada y PLC) se le agregó la descripción VHDL de la red de Petri, utilizando un método de traducción directa propuesto en [13]. En todo el desarrollo del nuevo tema, prevaleció la idea base de enseñar este lenguaje de descripción de hardware orientado al diseño [4]. La utilización de la herramienta de simulación, en el ambiente de desarrollo, fue de gran utilidad para el proceso de enseñanza-aprendizaje. Como consecuencia de ser la primera experiencia de incorporación temprana de VHDL, las clases en laboratorio sobre el tema, fueron realizadas sólo por un grupo de catorce alumnos (grupo piloto) de un total de sesenta y dos que componían el curso. El resto de los estudiantes (48) trabajó en la modalidad habitual en los laboratorios. El grupo piloto realizó un laboratorio consistente en la modelización, por medio de una Red de Petri, de un sistema secuencial de baja complejidad. El modelo resultante se describió en VHDL y se verificó su comportamiento por medio de simulación en el entorno de trabajo ISE WebPack [5].

En la etapa de valoración de los conocimientos adquiridos sobre VHDL orientado al diseño, se realizó una

prueba de evaluación a toda la población del curso. En la Tabla 1 se muestra un resumen de los resultados.

Se observa una sensible diferencia entre el grupo piloto y el resto de los alumnos. Efectivamente, en el grupo piloto el 79% obtuvo 80 o más puntos sobre 100 mientras que en el otro grupo esta calificación la obtuvo el 40%. Asimismo, en el grupo piloto sólo el 7% no alcanzó a aprobar mientras que en el otro grupo no alcanzó una calificación satisfactoria el 47%. Podemos resumir al respecto, que el trabajo en el ambiente de desarrollo, con actividades de simulación y verificación de comportamiento, tuvo una influencia altamente benéfica en el aprendizaje. Finalmente, no podemos obviar, que en estos resultados también incidió favorablemente la interacción alumno-alumno y alumno-profesor que se establece en los grupos de trabajo en laboratorio.

#### 4.2. Digital II

Digital II forma parte del ciclo superior de la carrera de Ingeniería Electrónica y es la segunda de las tres materias obligatorias del área digital. Está caracterizada como una asignatura de tecnología aplicada, ya que sus contenidos teóricos apuntan directamente a la solución de problemas prácticos del área, utilizando recursos y dispositivos concretos. En esta materia se abordan dos bloques de conocimientos, que si bien tienen fuertes puntos de contacto presentan características diferenciadas: Diseño constructivo a partir de bloques funcionales/Lógica Programable y Arquitectura Básica de Microprocesadores/Programación Assembler.

En la asignatura se introduce el diseño de sistemas digitales con un enfoque de tipo Top-Down, mediante el cual se divide el problema a abordar en módulos más sencillos, con el objetivo de poder describirlos como la interconexión de bloques funcionales a nivel RTL. Se trabaja con el entorno ISE WebPack [5], y se utiliza el flujo de ingreso por esquemáticos incorporando los bloques necesarios como elementos de biblioteca o como módulos personalizados si no se dispone de la funcionalidad requerida. En este marco, utilizando los conceptos básicos de diseño con VHDL introducidos en el semestre anterior en Digital I, se avanzó en la implementación de los subsistemas obtenidos a partir de la partición Top-Down del problema, con VHDL. La metodología utilizada se fundamentó en la resolución de problemas a partir de un conjunto de requerimientos, para lo cual el docente plantea y analiza distintas opciones de solución, seguido por los alumnos en sus puestos de trabajo con el ambiente de diseño instalado, estudiando el impacto de las distintas descripciones sobre las características y el comportamiento de los circuitos

**Tabla 2.** Importancia e interés en el tema

	Alta	Media	Baja	Muy baja	No opina
Importancia del tema	32,6%	37,2%	7,0%	4,7%	18,6%
Interés despertado	41,9%	44,2%	11,6%	2,3%	0,0%

**Tabla3.** Evaluaciones

	Alta	Media	Baja	Muy baja	No opina
Dificultad de las evaluaciones	27,9%	69,8%	0,0%	0,0%	2,3%
Coherencia entre nivel de clases y evaluaciones	34,9%	51,2%	9,3%	2,3%	2,3%

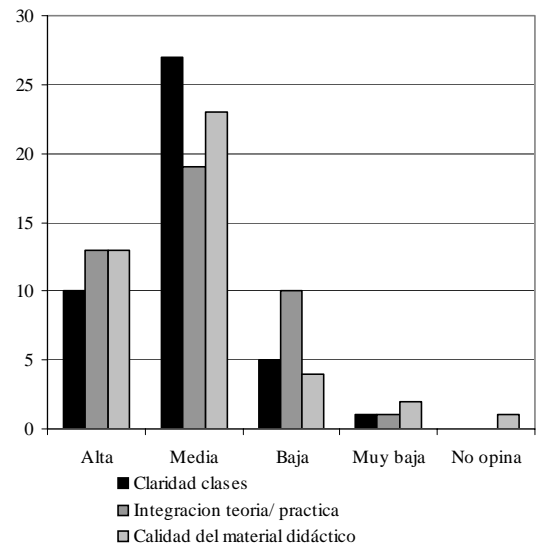
logrados. En este sentido, se trabajó sobre tres ejes íntimamente relacionados:

- Estilo de descripción VHDL de los dispositivos
- Esquemático a nivel RTL asociado
- Simulación de comportamiento

El trabajo, relacionando estos tres aspectos en un mismo diseño, permitió ubicar a los alumnos en el contexto de la descripción de elementos hardware y sus conexiones, ya que podían visualizar el sistema como interconexión de bloques RTL ya conocidos, verificar los cambios de comportamiento mediante simulación, y relacionarlos con la forma en que se había descrito el circuito en VHDL.

Los problemas encarados integraron en su solución el diseño con esquemas y con VHDL. Este enfoque permitió comparar las dos formas de descripción de un circuito poniendo en evidencia los beneficios de cada una. Las descripciones VHDL demostraron gran flexibilidad y brindaron la posibilidad de parametrizar el código. Estas características facilitaron la personalización de la funcionalidad de los módulos.

Por otro lado, los alumnos verificaron que este tipo de descripción simplificaba los cambios durante el proceso de depuración. Quedó claro que estas características son fundamentales al incrementarse la complejidad de los diseños. Por su parte, si la complejidad del sistema no es muy grande, los esquemas presentan la funcionalidad del circuito en forma muy clara al mostrar la conexión gráfica de módulos, constituyendo un apoyo importante durante el



**Fig. 1** Desarrollo de las clases

desarrollo del tema. Desde el punto de vista metodológico, el conocimiento de los bloques disponibles en biblioteca, simplificó el análisis de las distintas descripciones realizadas y ayudó a comprender el impacto que tienen los cambios en la descripción VHDL sobre las características y comportamiento del circuito.

La evaluación de los nuevos contenidos se realizó mediante un examen parcial individual y un trabajo práctico grupal encarado por equipos de dos alumnos. La evaluación parcial consistió en la descripción VHDL de un módulo sencillo, en el cual los requerimientos sobre interfaz y funcionalidad se establecieron considerando la duración de la prueba (1 hora). El trabajo práctico fue de un nivel de complejidad superior, ya que los alumnos trabajaron en grupo disponiendo de un período de dos semanas durante las cuales contaron con el apoyo de los docentes para resolver el problema planteado. En este sentido, debieron abordar el diseño de un sistema digital con un enfoque jerárquico, en el cual varios de los módulos constitutivos debían desarrollarse en VHDL. Cabe destacar, que el porcentaje de alumnos con calificaciones superiores a 6 (Aprobado) en el primer bloque temático de la materia, se incrementó de un promedio del 45% (2006 a 2008) a un 55% en 2009.

Para evaluar el impacto que tuvieron los cambios introducidos sobre los alumnos, se implementó una encuesta anónima y voluntaria una vez concluidas las evaluaciones del primer módulo de la materia, que fue respondida por cuarenta y tres estudiantes. En la misma, se realizaron preguntas referidas a distintos aspectos del

trabajo realizado y al interés que los nuevos conocimientos habían despertado, cuantificando cada aspecto con la escala: alta, media, baja, muy baja y no opina.

En la Tabla 2 se muestra que el 86% de los encuestados declaró tener un interés entre alto y medio por la nueva temática y el 70% calificó de igual manera la importancia que, a su juicio, tenían los nuevos conocimientos para su formación profesional.

La Fig. 1 muestra que la mayoría de los estudiantes manifestó estar satisfecho respecto de la claridad de las clases impartidas, la integración de aspectos teóricos y prácticos y la calidad del material didáctico entregado por la cátedra.

Los valores de la Tabla 3 ponen de manifiesto que la mayoría de los encuestados opina que la coherencia entre la profundidad en el desarrollo de los temas y la dificultad de las evaluaciones es razonable.

Los alumnos manifestaron, en un campo de libre respuesta dedicado a sugerencias, su interés de completar el flujo de diseño implementando los circuitos sobre placas de desarrollo. Esto sería muy importante, ya que según se ha verificado en las asignaturas optativas del área, el poder implementar los resultados de los diseños es muy conveniente para reafirmar los conocimientos e incentivar el interés de los estudiantes. Está previsto incorporar este tipo de actividades en cursados posteriores a partir de una actualización de los laboratorios que se encuentra en curso.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Los resultados informados en este trabajo son todavía parciales toda vez que la etapa de implementación está todavía en curso, no obstante esto, podemos considerarlos satisfactorios. Se puede decir que se ha verificado la utilidad de los HDL y los EDA como herramientas didácticas en la enseñanza del diseño digital y se ha incorporado, en las materias de grado, un poderoso instrumento para el modelado, simulación e implementación de sistemas digitales. La metodología aportó flexibilidad para efectuar cambios y permitió parametrizar los diseños. Sin embargo, pese al acento puesto en relacionar las descripciones HDL con el hardware asociado, subsiste la tendencia de los alumnos a utilizarlos como lenguajes de alto nivel tradicionales. Los estudiantes tienden a seguir pensando la descripción como puramente secuencial, olvidando que el objeto que ahora se describe es de una naturaleza completamente diferente. Se esfuerzan en buscar un código compacto, más que en lograr una buena descripción acorde con los requerimientos.

Finalmente se prevé incorporar una nueva optativa al Área, "Diseño digital orientado a SoC". Los temas

centrales a desarrollar serán: IP cores (software y hardware), procesadores embebidos de 8 y 16 bits (arquitectura y programación), ambientes integrados de trabajo, aplicaciones de procesamiento de señal, control y comunicación RF.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Ausubel, D.P., Novak J.D., Hnesian, H., "Sicología Educativa: un punto de vista cognoscitivo", Editorial Trillas, México, 1986 (de orig. 1978).
- [2] Bruner J. S., "Desarrollo cognitivo y educación", Editorial Morata, Madrid, 1988.
- [3] M. Castro, S. Acha, J. Perez, A. Hilario, J.V. Miguez, F. Mur, F. Yeves, J. Peire, "Digital systems and electronics curricula proposal and tool integration," in *Proc 30<sup>th</sup> ASEE/IEEE Annual Frontiers in Education*, vol. 2, 2000, pp.F2E/1-F2E/6.
- [4] V.A. Pedroni, "Teaching design-oriented VHDL", in *Proc. of the 2003 IEEE International Conference on Microelectronic Systems Education (MSE'03)*, 2003, pp 6- 7.
- [5] Xilinx Inc, en [www.xilinx.com](http://www.xilinx.com) .
- [6] Altera, en [www.altera.com](http://www.altera.com)
- [7] J. Macías-Guarasa et al. "A project-based learning approach to design electronic system curricula", *IEEE Trans. Education*, 49(3) 2006..
- [8] J. Northern "Project-Based learning for a digital circuits design sequence" in *Proc. IEEE Region. 5 Technical Conf.*, 2007 USA.
- [9] F. Machado, S. Borrromeo, N. Malpica, "Project based learning experience in VHDL digital electronic circuit design, Microelectronic Systems Education", *MSE '09. IEEE International Conference on*, 2009, pp 49-52.
- [10] [www.dsi.fceia.unr.edu.ar](http://www.dsi.fceia.unr.edu.ar)
- [11] R. Corti, R Martínez, E. D'Agostino, E. Giandoménico, "Experiencia didáctica en una carrera de Ingeniería Electrónica. Actualización de los contenidos del área digital", *Revista de Enseñanza de la Ingeniería*, año 7, no. 13, pp. 61–72, Dic. 2006.
- [12] G. Baliga, J. Robinson, L. Weiss L., "Revitalizing CS hardware curricula: object oriented hardware design", *The Journal of Computing Sciences in Colleges*, 25(3): 60-66, 2010
- [13] R. Martínez, J. Belmonte, R. Corti, E. D'Agostino, E. Giandoménico, "Descripción en VHDL de un sistema digital a partir de su modelización por medio de una Red de Petri", in *Proc. FPGA Designer Forum*, 2009 SPL, pp 7-11.