

Metodología de diseños sobre FPGA en un curso de sistemas digitales

José Luis Uribe Aponte

MSc. en Ciencias de la Computación, Universidad de los Andes
ASIC Engineer, HP Networking Hewlett-Packard Company,
Costa Rica
jose.l.uribe@jhp.com

Alejandro Forero Guzmán

MSc. en Ingeniería Electrónica, Ph.D (c) en Ingeniería,
Investigador Grupo SIRP, Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
alejandro.forero@javeriana.edu.co

Alejandra María González Correal

MSc. en Ingeniería Electrónica, Ph.D (c) en Ingeniería,
Investigador Grupo MIMESIS, Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
agonzalez@javeriana.edu.co

Juan Carlos Giraldo Carvajal

MSc. en Ingeniería Electrónica, Pontificia Universidad Javeriana
Docente Tiempo Completo Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
jcgiraldo@javeriana.edu.co

Francisco Fernando Viveros Moreno

Ingeniero Electrónico, Profesor Titular de Tiempo Completo,
Director del Grupo de Investigación MIMESIS,
Jefe de la Sección de Técnicas Digitales,
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
fviveros@javeriana.edu.co

Resumen— Se presenta en este trabajo una metodología para el diseño de sistemas digitales sobre FPGA (Field Programmable Gate Array). Esta metodología inicia con el análisis de requerimientos del cliente y abarca hasta la implementación final en un dispositivo programable. La propuesta metodológica ha sido aplicada y probada en los cursos del Área de Técnicas Digitales en la Carrera de Ingeniería Electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana – Bogotá, de acuerdo a un modelo de aprendizaje activo basado en proyectos (PBL, Project Based Learning) para lograr en los estudiantes un mayor conocimiento técnico significativo, aumentar su nivel de motivación hacia la ingeniería e incrementar su capacidad de comunicación, trabajo en equipo y capacidad de diseño. Todo esto es fruto del trabajo de investigación en educación en ingeniería que el grupo de profesores del área de Técnicas Digitales del Departamento de Electrónica de la Universidad, ha desarrollado en los últimos cuatro años.

Palabras clave— Aprendizaje Basado en Proyectos, Diseño de Sistemas Digitales, Metodología de Diseño.

Abstract— This paper present a methodology for the design of digital systems on FPGA (Field Programmable Gate Array). The proposed methodology offers a guide from initial stages of analysis of customer needs until the final implementation in a programmable device. The methodology has been applied and validated in courses of Digital Systems Design in Electronic Engineering Program at Pontificia Universidad Javeriana - Bogotá, following a model of PBL (Project Based Learning) allowing students to achieve a significant learning in technical issues, increasing their level of motivation toward engineering and enhancing their communication

skills, teamwork and design capabilities. This is the result of research during the last four years in engineering education, developed by the group of professors of Digital Electronics.

Keywords— Design Methodology, Digital Systems Design, Project Based Learning.

I. MOTIVACIÓN

Como el estudiante es el eje central de los procesos de formación integral en la Pontificia Universidad Javeriana y, en consecuencia, se da mayor énfasis a su aprendizaje activo, se ha incorporado al currículo de Ingeniería Electrónica con mayor fuerza y gran aceptación modelos de Aprendizaje Basados en Proyectos (PBL, Project Based Learning) [1]. Junto con innovadoras iniciativas en el aula de clase los profesores de la Sección de Técnicas Digitales han llegado a la consolidación de una Metodología de Diseño de Sistemas Digitales, cuya aplicación ha demostrado ser efectiva a lo largo de varios años con resultados positivos tanto en cursos avanzados como en trabajos de grado y proyectos de investigación de Maestría. La metodología propuesta incluye diferentes fases secuenciales con las que se desarrollan los procesos de diseño e implementación de un sistema digital, las cuales se mencionan a continuación.

Especificación de los requerimientos del cliente y concepción de una arquitectura y organización del sistema digital que satisfaga dichas especificaciones; esta fase equivale a una descripción general, o por módulos, del sistema. Diseño, apoyado en un lenguaje de descripción de Lógica de Transferencia a nivel de Registro (RTL, Register Transfer Logic), del comportamiento dinámico de cada uno de los módulos del sistema digital. Descripción y documentación de la conectividad entre los módulos del sistema digital, esta descripción complementa el trabajo previo para proceder a la codificación en el lenguaje de descripción de hardware VHDL (Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language) [2].

Posteriormente, se continúa la evaluación, la cual incluye las fases simulación; de análisis de resultados que involucra procesos de síntesis y compilación; verificación e implementación en un dispositivo real; y validación de especificaciones. Por último, y para enfatizar el carácter pedagógico de la propuesta, se realiza una reflexión personal y grupal que evalúa la experiencia en todos sus ámbitos. La metodológica presentada, establece pautas que permiten su aplicación tanto de manera individual como colaborativa. Según la complejidad del sistema digital proyectado, los procesos de diseño, implementación y validación pueden ser realizados por una sola persona o por diferentes equipos de trabajo.

La característica de trabajo colaborativo se evidencia cuando los estudiantes, para el desarrollo de su proyecto final, realizan un juego de roles y desempeñan las funciones de Arquitectos y Diseñadores entre cursos dirigidos por diferentes profesores. Cabe aquí mencionar que esta forma de trabajo entre Arquitectos y Diseñadores recrea los roles de equipos de diseño y desarrollo encontrados comúnmente en la industria electrónica de diseño de sistemas digitales.

Para lograr una comunicación efectiva y formal entre los diferentes actores, se utilizan herramientas tecnológicas como, por ejemplo, foros, comunicaciones instantáneas y correo electrónico.

Una de las estrategias de evaluación de los estudiantes que usaron esta metodología, fue presentada ante el Ministerio de Educación Nacional y actualmente hace parte del Banco de Experiencias exitosas del mismo. En esta presentación, dicho trabajo fue calificado como una propuesta

innovadora y de alta calidad, y, recibió la máxima calificación que dieron los evaluadores del Ministerio en el Foro Nacional de Evaluación, que se llevó a cabo en Noviembre de 2008 [3].

La estrategia presentada al Ministerio mostró que la metodología propuesta guía al estudiante en su proceso de diseño, fortalece sus competencias y habilidades profesionales esenciales, como la comunicación efectiva en todos los aspectos (oral, gráfica y escrita), incentiva la capacidad para proponer soluciones creativas y la habilidad para trabajar en equipo, lo cual se ve reflejado en un aumento de motivación hacia su carrera y un mejor afianzamiento en los conceptos de diseño electrónico digital.

El presente documento se encuentra dividido en cinco secciones. En la sección II, se describe brevemente las fases y componentes de la metodología de diseño digital propuesta. En la III, brevemente se describe aprendizaje basado en proyectos. En la IV, se describe el proyecto bajo el cual se desarrolla la metodología de diseño digital que se propone. Finalmente en la V, se describen las conclusiones y los niveles de competencia que alcanzan los estudiantes que participaron de esta experiencia.

II. METODOLOGÍA DE DISEÑO DIGITAL

La propuesta metodológica que se presenta está dividida en tres fases interdependientes y una adicional de verificación que es transversal a todo el proceso de diseño. En la Fig. 1, se muestra el esquema metodológico resumido.

Se parte de los requerimientos dados por un cliente que en este caso es el profesor del curso, los cuales son recibidos por los arquitectos del sistema, quienes los sintetizan en un documento llamado "Especificación preliminar". A partir de este momento y con una perspectiva Top-Down [2], [4], se comienza el proceso de diseño arquitectónico con un diagrama general de entradas y salidas del sistema que se va a diseñar, para realizar luego una descomposición funcional y una descripción en diagrama de bloques. Es muy importante resaltar que en estos últimos diagramas, no se presentan elementos lógicos básicos, como registros y compuertas, esto con el fin de ganar un mayor nivel de abstracción en el proceso de diseño.

Posteriormente, se realiza un diagrama de tiempos, en el cual se describe de forma dinámi-

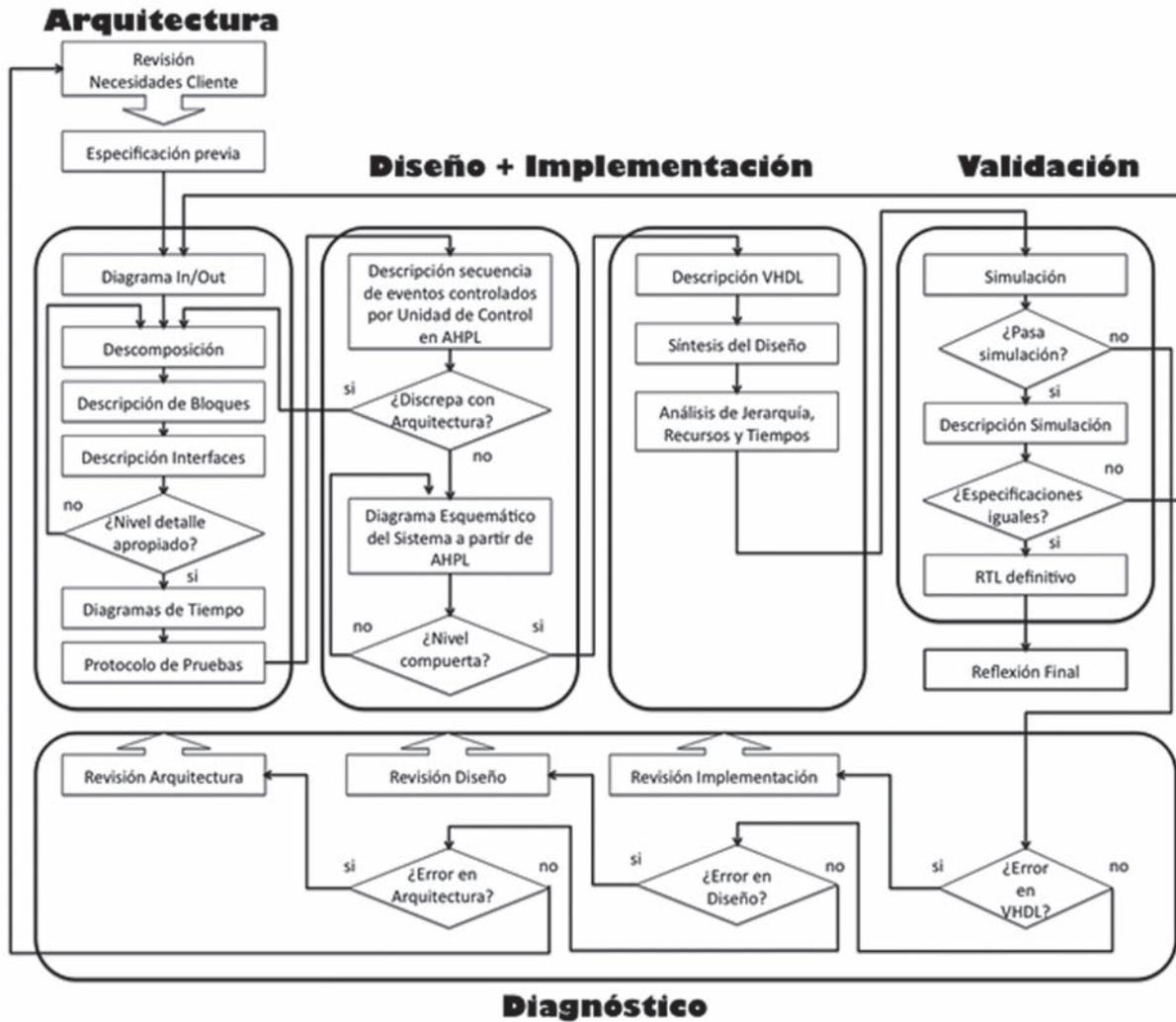
ca el comportamiento de los bloques internos del sistema y, por ende, del sistema total, y de esta forma se puede verificar el funcionamiento del mismo.

Después de esta descripción que clarifica el funcionamiento interno del sistema, se plantea un protocolo de pruebas para el sistema total y los subsistemas que lo conforman, con el fin de esta-

blecer, cuáles, cómo y en qué entornos desarrollar las pruebas que garantizan su funcionamiento.

Las anteriores etapas se definen como el proceso de diseño arquitectónico y son realizadas por los arquitectos del proyecto, los cuales conocen a profundidad los requerimientos del sistema, adicionalmente del entorno en el cual éste funcionará.

FIG. 1. ESQUEMA METODOLÓGICO PARA LA CREACIÓN DE SISTEMAS DIGITALES



Con el fin de estructurar y describir de forma más detallada la dinámica del sistema, se realiza una descripción en lenguaje AHPL (A *Hardware Programming Language*)[4] a partir del diagrama de tiempos. Este lenguaje fue desarrollado por Frederick J. Hill y Gerald R. Peterson y permite la descripción de cualquier *hardware* digital.

Con base en la descripción en AHPL, se procede a realizar un esquemático preliminar del sistema, de tal modo, que si no es posible llegar a un circuito lógico, se debe realizar un refinamiento iterativo sobre la descripción en AHPL.

Como se ha mencionado, la metodología propuesta está orientada a la implementación en

FPGA, por lo que es necesario describir el sistema en un lenguaje de *hardware* sintetizable. Se ha decidido usar VHDL, dado que es uno de los lenguajes de mayor difusión para la implementación de sistemas digitales [5].

Ya con el diseño implementado, se realiza un análisis de tiempos (retardos, propagación, riesgos estáticos) y recursos para evaluar qué tan eficiente es el sistema y qué desempeño tendría en una implementación física. Posteriormente se procede a realizar un proceso de simulación, con base en el protocolo de pruebas desarrollado en la fase de diseño arquitectónico, con el fin de verificar que el sistema realice las funcionalidades para las cuales fue creado. Esta fase de diseño, concluye cuando el proceso de simulación se alcanza de forma exitosa que confirma el funcionamiento del sistema digital propuesto en la arquitectura del sistema. De esta forma, las etapas presentadas que van desde el diseño arquitectónico hasta la simulación se conocen como la fase de diseño e implementación del sistema y es desarrollado por los diseñadores del proyecto, apoyados de herramientas de software como Quartus® II de Altera.

Una vez implementado el sistema digital, se debe realizar un proceso de validación que confronte el funcionamiento del sistema con los requerimientos del cliente y se verifica que el sistema cumpla con las exigencias y propósitos para el cual ha sido creado. Esta fase en la metodología se conoce con el nombre de "Validación del Sistema".

Dado que la metodología propuesta se encuentra enmarcada en un entorno académico, los usuarios potenciales de ésta han sido los estudiantes que realizan sus proyectos de sistemas digitales según las fases anteriormente descritas. Por lo tanto, al finalizar el proyecto se invita a los estudiantes que realicen una reflexión escrita en donde cada uno de ellos describe los logros de aprendizaje, las dificultades personales y los alcances y proyecciones del proyecto realizado. En esta etapa se presentan todos los aspectos positivos, negativos y replicables en la elaboración del mismo.

Como se ha mencionado, la metodología es empleada por los estudiantes de las asignaturas del Área de Técnicas Digitales, en el cual se usa la estrategia de Aprendizaje Basada en Proyectos

[6],[7], que permite el análisis y evaluación continua de problemas, a su vez que se designan proyectos específicos. De esta forma, los estudiantes encuentran un esquema de diseño que les permite cumplir los objetivos propuestos por las asignaturas, al par que desarrollan sistemas de complejidad media a alta, y aumentan así el nivel de motivación y aprendizaje en los temas de Electrónica Digital. Por lo anterior y para precisar el contexto en el cual los estudiantes aplican esta metodología, se explica en la siguiente sección cómo se usa el modelo de Aprendizaje Basado en Proyectos.

III. APRENDIZAJE BASADO EN PROYECTOS

La educación universitaria ha tenido como práctica tradicionalmente privilegiada la clase magistral. En esta práctica, la exposición de los contenidos ha sido asumida como responsabilidad del profesor, quien, a su vez, establece los ejercicios que serán empleados para la puesta en práctica de los conceptos [8]. Contrario a esta tendencia, en la enseñanza de la Ingeniería se ha generado una transformación desde hace ya algunos años. Aparecen propuestas que dan más importancia a la práctica y el rol participativo de quien aprende, se toma distancia de aquellos modelos en los cuales el profesor definía el eje de cualquier interacción y el ritmo que la caracterizaba [9].

Ejemplo de tales transformaciones es la propuesta de aprendizaje del Modelo MIMESIS [10], en la cual el espacio de aula de clase se constituye en ámbito de convergencia de maestros y estudiantes, en el que son éstos últimos quienes tienen un papel protagónico. El desarrollo de proyectos de semestre, por grupos de estudiantes, es el eje articulador de la interacción profesor-estudiante y así, éstos hacen posible compartir la diversidad de conocimientos y experiencias con que cuentan unos y otros [9], [11]. *PBL* se caracteriza por la organización de los procesos de aprendizaje en torno a preguntas complejas que retan al estudiante a llevar a cabo un proyecto a través del cual ha de llegar a una solución viable [7], [6]. Toda propuesta de *PBL* se configura fundamentalmente a partir de cinco criterios que guían su puesta en práctica [6] así:

- a. El *PBL* es central y no periférico al currículo: criterio que resulta especialmente exigente por-

que supone la coordinación de todos los profesores del programa y su puesta en práctica en todas las asignaturas del plan de estudios.

- b. Los proyectos se focalizan en preguntas o problemas que dirigen los estudiantes para encontrar los conceptos y principios que han de dominar: Las preguntas orientadoras y los problemas abiertos hacen posible que el estudiante haga conexiones entre las actividades y los conceptos fundamentales.
- c. Los proyectos involucran a los estudiantes en una investigación constructiva: aquí la investigación se desarrolla en torno a preguntas centrales, a la construcción de conocimiento y a la resolución de una pregunta; todo ello orientado a aportar a la construcción de conocimiento relevante para el desarrollo del proyecto.
- d. Los proyectos son dirigidos por los estudiantes: Se busca incentivar a través de ellos la autonomía de los estudiantes, el trabajo bajo condiciones no supervisadas y la responsabilidad personal.
- e. Los proyectos se basan en hechos reales: son retos que posiblemente pueden encontrar los estudiantes, en el ejercicio de su profesión; su potencial está en su autenticidad.

IV. JUEGO DE ROLES

Un ejemplo de aplicación de *PBL* en el curso de Diseño de Sistemas Digitales de sexto semestre, es el “juego de roles”, en donde el estudiante aplica la metodología de diseño propuesta, en un ambiente muy cercano a la práctica profesional. El curso de Diseño de sistemas Digitales, está enfocado al aprendizaje de la metodología de diseño y se fundamenta en conceptos trabajados en anteriores semestres, como son la lógica combinatoria y secuencial.

A través de este juego, los estudiantes tienen la oportunidad de desempeñar tareas que les ayudan en su proceso de construcción de conocimiento. Se identifican tres roles en este proceso: un grupo de arquitectos, quienes están encargados de especificar el sistema basándose en los requerimientos del cliente; un grupo de diseñadores, quienes a partir de las especificaciones, estructuran la organización interna de los bloques propuestos por los arquitectos e implementan el sistema; y finalmente, el grupo de verificadores,

quienes a partir de los requerimientos y la especificaciones valida y prueba el producto final. De estos tres roles únicamente los dos primeros se trabajan en el curso de pregrado, se deja el de verificador para los cursos de maestría.

El juego se diseña para recrear una situación real de interacción de roles de arquitectos y diseñadores que están ubicados en diferentes lugares geográficos, donde la distancia se modela mediante la implementación del juego entre dos cursos, con diferente profesor y horario de clase: Grupos A y Grupos B. Se proponen dos proyectos, de tal forma que para el primero los arquitectos pertenecen a los Grupos A y los diseñadores a los Grupos B y para el segundo la asignación de roles a los grupos es al contrario, se logra que cada uno tenga la oportunidad de asumir los dos roles. Es de anotar que una pareja Arquitecto Grupo A y Diseñador Grupo B no es la misma que Arquitecto Grupo B y Diseñador Grupo A, con lo cual se amplía el número de interacciones comunicativas.

El juego está programado para las últimas cinco semanas del semestre; dedicación equivalente al 30% de un curso de tres créditos, con tres horas de asesoría con los profesores, tres horas de laboratorio con monitores y tres horas de trabajo autónomo. Inicialmente, se propone cada uno de los sistemas que van a diseñar en los dos cursos, mediante los requerimientos de un cliente y todos los grupos de los dos cursos asumen el rol de arquitectos, generan la especificación del sistema, el diagrama en bloques y la descripción en tiempo, a la luz de la metodología propuesta; el rol de arquitecto se desarrolla en dos semanas y media y se realiza dentro y fuera del aula. Al culminar la arquitectura, cada grupo envía a sus respectivos diseñadores los documentos mediante la plataforma Blackboard®, herramienta institucional de enseñanza virtual en la Pontificia Universidad Javeriana.

En este momento, todos los grupos asumen el rol de diseñador, cuya primera tarea es la revisión del documento que contiene la arquitectura del sistema. De este estudio preliminar, surgen dudas y preguntas hacia sus respectivos arquitectos quienes deben hacer las correcciones y aclaraciones necesarias para permitir el desarrollo normal de la implementación. Los diseñadores describen, el hardware del sistema en AHPL y elaboran el esquemático, a partir de la especificación. Pos-

teriormente describen el sistema en VHDL para, finalmente, ser simulado e implementado en el dispositivo de lógica programable.

De esta forma, toda la experiencia que recogen los estudiantes, aparte de incrementar su conocimiento significativo, busca desarrollar en ellos diferentes competencias que les proporcionen un valor agregado a su formación de ingenieros electrónicos, para que puedan enfrentar de una mejor manera los retos y problemas de su futura vida profesional. Entre estas competencias se destacan: Comunicación, Trabajo en grupo y capacidad de diseño e innovación. A continuación, en la parte IV, se desglosan cada una de estas competencias.

En esta experiencia de aprendizaje, cuatro de los cinco criterios que constituyen las propuestas de Aprendizaje Basado en Proyectos, orientaron la concreción de la misma. No fue implementado el primero de ellos debido a que la implementación se realiza únicamente en el conjunto de asignaturas correspondientes al Área de Técnicas Digitales del programa de Ingeniería Electrónica y no en todo el programa. El juego de roles requiere de la integración de los docentes del área, la sincronización de tiempos del curso y la evaluación colectiva de proyectos.

V. CONCLUSIONES: ALCANCE DE COMPETENCIAS

La metodología de diseño digital aquí propuesta, constituye un conjunto de etapas ordenadas, que desarrollan la especificación, el diseño, la implementación y la verificación del sistema. En el caso del esquema propuesto, más allá de plantear un ciclo de vida de un sistema digital, se propone una metodología orientada a desarrollar competencias profesionales en los estudiantes de Ingeniería Electrónica. Esta metodología, concebida, desarrollada y estructurada por los profesores de la Sección de Técnicas Digitales, es un esfuerzo consciente por trabajar sobre algunas competencias en aras de mejorar la educación que se imparte y alcanzar un perfil del egresado con habilidades profesionales que satisfagan las necesidades del entorno en el área de diseño digital. De esta forma se identifican tres competencias objetivo: la comunicación efectiva, el trabajo en equipo y la capacidad de diseño [12], [13].

A. Comunicación

En cada momento de la actividad planteada, los grupos de estudiantes son responsables de dos trabajos, los cuales se establecen según el roles que desempeñan: el de arquitectos o el de diseñadores. En ambos casos la interacción entre los grupos es indispensable para el éxito del ejercicio; es así como para la culminación exitosa del ejercicio cada estudiante debe mejorar sus habilidades comunicativas. Se observa cómo a medida que se desarrolla la actividad del juego de rol, los grupos desarrollan una práctica comunicativa que mejora las habilidades de cada estudiante para comunicar e interpretar lo que el otro grupo les comunica. En el ejercicio planteado se promueve activamente, tanto el rol de emisor, como el de receptor, en el cual los estudiantes pueden expresar ideas propias o hacer planteamientos grupales; igualmente están expuestos a recibir (escuchar y entender) las propuestas de sus pares. Una habilidad comunicativa complementaria es la comprensión de lectura mediante el análisis de los requerimientos del cliente y las especificaciones de los arquitectos. Esta actividad enfrenta al estudiante con la tarea de evaluar ideas de otros, para luego aceptarlas o rechazarlas [14].

Como característica adicional, el ejercicio se orienta hacia la comunicación escrita; aunque no se prohíbe la interacción oral, se promueve e incentiva un registro escrito, de tal forma que se pueda aplicar cualquier modificación sobre las especificaciones originales. También se incentiva formas de comunicación escrita como el uso de gráficas, diagramas y cuadros para facilitar la especificación y el seguimiento del trabajo técnico. Todo esto busca resaltar la importancia de la documentación como elemento para generar memoria individual y colectiva, y resaltar la formalidad que se alcanza mediante el documento escrito, que evita la ambigüedad y trasciende las opiniones personales.

Finalmente, un aspecto de gran importancia en el ámbito profesional es el uso de un segundo idioma, para lo cual los estudiantes hacen sus presentaciones orales finales en Inglés, de las cuales se cuenta con un registro en video en las que comparten sus experiencias de aprendizaje.

B. Trabajo en equipo

Uno de los objetivos de la propuesta es desmitificar la idea generalizada que explica el trabajo en grupo como la división en tareas entre los integrantes del grupo [12], [13]. Por el contrario, el ejercicio que se propone motiva y valora la creación colectiva, la confrontación de propuestas, la elaboración y cumplimiento de cronogramas en conjunto, entre otras actividades desarrolladas de forma colectiva.

El desarrollo del trabajo colaborativo origina un tránsito de los participantes por diferentes roles que reproducen algunas de las funciones que un ingeniero diseñador puede asumir en su cotidianidad laboral. Adicionalmente, se reconoce que la construcción colectiva, nace del aporte individual y permite que los participantes puedan estar expuestos a más de una opción de diseño, las cuales se conformarán como experiencia personal que aplicará en diseños futuros.

Las interacciones entre los grupos y dentro de cada grupo, evidencian el valor de la participación activa, cuando cada grupo presenta una propuesta; y la participación pasiva, cuando el mismo escucha una idea de sus pares. Ambas actitudes son fundamentales para que la comunicación fluya [14], [15]. Además, en este proceso los participantes descubren que la mayoría de veces no existe una única “mejor idea” y que en una muy buena construcción, es posible descartar buenas propuestas en el camino sin detrimento de los resultados finales. Finalmente, durante todo el proceso, la habilidad argumentativa se ve fortalecida. La capacidad para argumentar es el elemento mediador entre las ideas que interpreta el diseñador y las directrices que proponen los arquitectos. El fortalecimiento de todas estas habilidades se hace evidente a medida que el juego de rol se desarrolla y los diferentes registros del mismo se registran.

C. Diseño-El ejercicio hace énfasis en algunas de las características de los procesos formales de diseño, comúnmente encontrados en la industria. Por ejemplo, es importante que el sistema pueda ser de fácil verificación, y que en el contexto de una organización pueda ser implementado y mantenido por terceros, procurando que sea un diseño reproducible. Todo lo anterior está asociado a

la incorporación, uso, auge y gran crecimiento de una tecnología específica, que define las particularidades del proceso de diseño, en este caso los dispositivos de lógica programable *FPGA*.

La interacción entre los estudiantes en sus dos roles: Arquitectos y Diseñadores, fortalece la comprensión por parte del estudiante de las tareas asociadas a cada uno de los roles. Adicionalmente, produce que ellos mismos reconozcan como la ejecución exitosa de un proceso de diseño se basa en el desarrollo de un método claramente definido y bien estructurado. Dicho método no se limita a solucionar problemas, sino que sistematiza el proceso para llegar a la implementación de un prototipo y adicionalmente permite plantear un camino desde lo general hasta lo específico, es decir, desde la planeación del sistema hasta la verificación de cada uno de los componentes. El desarrollo del ejercicio produce que el estudiante incorpore estos conceptos a través de la vivencia de sus roles, lo cual se evidencia en la finalización exitosa de los proyectos.

Por otra parte, esta propuesta de diseño, que como ya se ha mencionado es *Top – Down*, intenta evitar la sobre-especialización, o las miradas minimalistas, las cuales sobreestiman las herramientas de diseño y desarrollo, se concentran en exceso en los detalles y pierden la perspectiva general. También se busca resaltar durante toda la actividad la importancia de elaborar una clara y rigurosa documentación y de destacar la importancia del carácter cíclico (iterativo) del avance en el diseño. Es indispensable disponer de un registro histórico que posibilite la reconstrucción, ya sea para retomar ideas o replantear nuevas alternativas, esto lo evidencia e incorpora cada uno de los estudiantes cada vez que su propio proceso de desarrollo de la actividad lo obliga a retroceder y retomar en un punto previo.

Por último, el ejercicio recalca la importancia de motivar la creatividad, como una habilidad esencial en el proceso de desarrollo: es la vía que permite pasar de un escenario particular a otro contexto, a un universo de opciones que deben ser exploradas y evaluadas. La creatividad como espacio de construcción se hace evidente, el desarrollo de cada grupo, al pasar de unos requerimientos a múltiples diseños posibles, y nuevamente al confrontar diferentes formas de lograr

los resultados al interactuar entre los diferentes roles que cada grupo asume.

REFERENCIAS

- [1] P. C. Blumenfeld, E. Soloway, R. W. Marx, J. S. Krajcik, M. Guzdial and A. Palinscar. (1991). *Motivating project-based learning: Sustaining the doing, supporting the learning*, *Educational Psychologist*, 26, 369-398.
- [2] W. Wolf. (2004). *FPGA Based System Design*. Prentice Hall, 2004.
- [3] F. Viveros, A. González, A. Forero, G. Marciales and M. Ruiz. *Evaluación del Aprendizaje Activo en un Curso de Diseño Digital en la Carrera de Ingeniería Electrónica*. *Foro Nacional de la Evaluación*, Ministerio de Educación Noviembre 14, 2008.
- [4] F. Hill and G. Peterson. (1987). *Digital Systems: Hardware Organization and Design*, 3^o ed. Wiley.
- [5] J. L. Uribe and J. C. Gómez. (2008). *Creación de Sistemas Digitales: Una perspectiva desde MDA – Proyecto Simbiosis – Revista Electrónica Paradigma*. Vol. 2 / No. 3. ISSN: 2011-0065.
- [6] J. W. Thomas. *A review of research on Project-based learning*. Disponible en <http://www.autodesk.com/foundation>.
- [7] L. Helle, P. Tynjälä and E. Olkinouora. *Project-based learning in post-secondary education –theory, practice and rubber sling shots*. *Higher Education* 2006, 51, 287-314.
- [8] Crawley E., J. Malmqvist, S. Ostlund and D. Brodeur, *Rethinking Engineering Education: The CDIO Approach*, Springer, 2007.
- [9] R. Felder. (1987). *On creating creative engineers*. *Engineering education*, No. 77, 222-227.
- [10] *Proyecto Hewlett Packard - Departamento de Electrónica, Pontificia Universidad Javeriana- Bogotá*. Disponible en <http://triton.javeriana.edu.co/proyecto-hp/main2.html>.
- [11] D. Kolb. (1994). *Learning styles and disciplinary differences*. In *teaching and learning in the college classroom*, Editorial k.a. Feldman and m.b. Paulsen. Needham heights, ma.:ginn press.
- [12] E. Crawley: *Creating the CDIO Syllabus, a universal template for engineering education: Frontiers in Education*, 2002. *FIE 2002*. 32nd Annual page(s): F3F-8 - F3F-13 Vol.2. ISSN: 0190-5848
- [13] Hu Xiong-xin, Yao Yuan, Gao Hong-li. *the MOE Key Laboratory of Mechanical manufacture and Automation Zhejiang University of technology, Hangzhou 310004, China; Analog Electronic Technique Teaching Architecture Based on CDIO Model; Journal of Electrical & Electronic Education*; 2008-04
- [14] Jian Ming-lian, Dong Chun-lai, ZHOU Li. *School of Geodesy & Geomatics Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang The practice of fundamental teaching reform on geodesy based on CDIO; Science of Surveying and Mapping*; 2009-06
- [15] Wang Zheng-hong¹, Gong Fang-hong² ¹. *School of Information Science & Engineering, Jiangsu University, Changzhou; Development and Innovation to the Theory of Engineering Teaching and Learning; Journal of Jiangsu Polytechnic University*; 2009-02