

# DESARROLLO DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO SOBRE LA CAPA FÍSICA WIMAX 802.16D DE LA IEEE

Yakdiel Rodríguez-Gallo Guerra, Juan Pablo Barrios Rodríguez, Carlos Roche Beltrán  
Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica. Facultad de Ingeniería Eléctrica  
Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, UCLV  
Santa Clara, Cuba  
yrodriguez-gallo@uclv.edu.cu, barrios@uclv.edu.cu, croche@uclv.edu.cu

**Resumen-** La Radio Definida por Software (SDR) se ha convertido en una solución para el desarrollo de sistemas de comunicación inalámbricos por las ventajas que brinda. La mayor parte de las plataformas SDR son implementadas en FPGAs debido a que ellas son capaces de soportar el procesamiento de la señal de los más modernos protocolos inalámbricos de alta velocidad. En este trabajo se presenta el diseño de prácticas de laboratorio sobre la implementación de la capa física WirelessMan-OFDM del estándar de la IEEE 802.16d (WiMAX) utilizando las herramientas System Generator de Xilinx y MATLAB/SIMULINK. Se presenta la implementación en hardware reconfigurable de módulos desarrollados en System Generator. Estas prácticas se conciben con la finalidad de contribuir a que el alumno interactúe con los elementos que conforman la capa física de este sistema de comunicación; y así profundicen sus conocimientos sobre esta tecnología.

**Palabras clave-** WiMAX; SDR; Capa Física; Prácticas de Laboratorio; SysGen; Simulink; FPGA.

## I. INTRODUCCIÓN

Las tecnologías inalámbricas están cada vez más presentes en el mundo. Ellas están siendo incorporadas en aplicaciones como documentos de identidad, sistemas de pago, casas inteligentes, dispositivos médicos. La tecnología WiMAX es un sistema de acceso inalámbrico de banda ancha de largo alcance que puede entregar grandes cantidades de información de forma económica y se utiliza principalmente para ofrecer cobertura a zonas de difícil acceso. Además, brinda a las empresas y a los consumidores un acceso ininterrumpido a una gran variedad de aplicaciones como: juegos en línea, música digital, televisión, videoconferencias y otros servicios en tiempo real. WiMAX es realmente importante para los países en vías de desarrollo y la familia 802.16 de la IEEE ayuda a solucionar los problemas de conectividad de “última milla” [1].

Hace algunas décadas, los sistemas de comunicación eran analógicos, pero el progreso de la tecnología hizo posible la transmisión de los datos de forma digital. En los últimos años la Radio Definida por Software (SDR) ha ido en aumento. Este término fue introducido por Joseph Mitola de la Corporación MITRE en 1991. Su primer artículo sobre este tema fue

publicado en 1992 en la IEEE National Telesystems Conference [2]. En SDR el procesamiento de las señales en la comunicación de radio son hechas en software en vez de en hardware. De este modo, en SDR la señal será tratada en la esfera digital y no en la esfera analógica como ocurre en la radio convencional. De forma general, SDR (Fig.1) es definida como un software basado en una plataforma de comunicación con características que pueden ser reconfiguradas y modificadas para realizar funciones diferentes en tiempos diferentes [3].

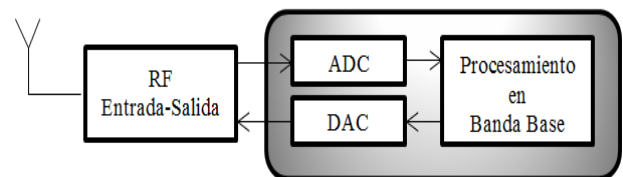


Figura 1. Diagrama en bloque de la Radio Definida por Software.

Los constantes avances en el desarrollo de dispositivos lógicos programables como los FPGAs (Field-Programmable Gate Arrays) han propiciado que ellos sean usados para implementar las funciones del procesamiento de las señales de las capas físicas en sistemas de comunicación inalámbricos [4]. En los últimos años se han desarrollado una serie de herramientas, como el entorno System Generator (SysGen) de Xilinx, que facilitan el diseño de algoritmos de Procesamiento Digital de Señales (DSP) sobre FPGAs [5]. SysGen es una herramienta de software que se integra con la herramienta Simulink en Matlab y permite la descripción y síntesis de sistemas de procesado de señales. Matlab es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Se ha convertido en la herramienta de preferencia usada para investigaciones de alta productividad, desarrollo y análisis [6].

Este trabajo aborda el desarrollo de prácticas de laboratorio sobre la capa física WirelessMan-OFDM del estándar de la IEEE 802.16 del 2004. Se presentan características de los estándares 802.16, de las herramientas de software utilizadas para las prácticas; así como el flujo de diseño elaborado. A

continuación aparecen características del modelo implementado y se hace referencia a los módulos desarrollados usando SysGen, basándose en el concepto de SDR. Finalmente se explica cómo están conformadas las prácticas de laboratorio creadas.

## II. ESTÁNDARES WIMAX IEEE 802.16

La tecnología WiMAX está basada en el estándar de la IEEE 802.16, que también se conoce como redes inalámbricas de banda ancha de área metropolitana (WirelessMAN). El grupo de trabajo 802.16 se formó en julio de 1999. La primera versión del estándar IEEE 802.16 fue aprobada en diciembre de 2001. En la Tabla I aparece una comparación de varias de estas versiones [7], [8], [9].

TABLA I. DATOS BÁSICOS DEL ESTÁNDAR IEEE 802.16

	IEEE 802.16-2001	IEEE 802.16d-2004	IEEE 802.16e-2005
<b>Completado</b>	Diciembre 2001	Junio 2004	Diciembre 2005
<b>Espectro</b>	10 – 66GHz	< 11GHz	< 6GHz
<b>Propagación</b>	LOS	NLOS	NLOS
<b>Modulación</b>	QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDM con 256 subportadoras, BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM	OFDMA escalable, QPSK, 16QAM, 64-QAM, 256-QAM
<b>Movilidad</b>	Sistema Fijo	Sistema Fijo	Sistema Móvil

## III. CAPAS FÍSICAS DEL ESTÁNDAR IEEE 802.16D

La capa física es la primera de las siete capas del modelo OSI. Es la encargada de las conexiones físicas, funciones (tipo de modulación, codificación, tasa de transmisión binaria) que se requieren para transportar los bits de datos entre los extremos físicos del enlace de comunicación. Para las redes WirelessMAN basadas en el estándar 802.16 del 2004 se definen cinco interfaces aéreas distintas para la capa física, las cuales se muestran en la Tabla II con algunas de sus características.

TABLA II. INTERFACES FÍSICAS DEL ESTÁNDAR IEEE 802.16D

Interfaces físicas	Banda de operación	Alternativas de duplexación
WirelessMAN-SC	10-66 GHz	TDD, FDD
WirelessMAN-SCa	Bandas licenciadas	TDD, FDD
WirelessMAN-OFDM	Bajo los 11 GHz	TDD, FDD
WirelessMAN-OFDMA	Bandas licenciadas	TDD, FDD
WirelessHUMAN	Bajo los 11 GHz	TDD

## IV. HERRAMIENTAS DE SOFTWARE Y FLUJO DE DISEÑO

System Generator es una herramienta de modelado que facilita el diseño en el hardware (FPGA). Es útil para la exploración de algoritmos, el diseño de prototipos y el análisis de modelos. Proporciona que sistemas de alto nivel sean compilados automáticamente en una FPGA [10]. Esta

herramienta incluye en Simulink la librería llamada “Xilinx Blockset”. Además, permite el traslado del modelo implementado a los lenguajes de hardware VHDL o Verilog. Este software al estar incluido dentro del Simulink tiene como ventaja que permite usar las potencialidades que brinda Matlab para la comprobación del correcto funcionamiento del sistema programado, pudiéndose interrelacionar con las demás librerías que aparecen en Simulink. SysGen puede generar un proyecto desde Matlab que se utiliza para terminar el diseño en el software Xilinx ISE y de ahí implementarlo en FPGAs de Xilinx o se puede implementar directamente en FPGAs de Xilinx utilizando la Co-Simulación a través del puerto JTAG. Se puede verificar la funcionalidad del diseño con la herramienta ModelSim de Mentor Graphics, la cual constituye la entrada a las herramientas de síntesis e implementación en las FPGAs [11].

Xilinx ISE (Integrated Software Environment) es un software profesional de diseño de circuitos que permite realizar un diseño completo basado en lógica programable (tanto CPLD como FPGA). El código obtenido en SysGen puede ser sintetizado con la herramienta “Xilinx Synthesis Technology” (XST), integrada en ISE [12].

Matlab es un software que contiene programación de alto nivel, que se acompaña de un conjunto de librerías o herramientas (toolboxes); y las de Simulink, con los paquetes de bloques (blocksets). Dentro de sus prestaciones se encuentran: la manipulación de matrices, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario, la comunicación con programas en otros lenguajes y con dispositivos de hardware [6].

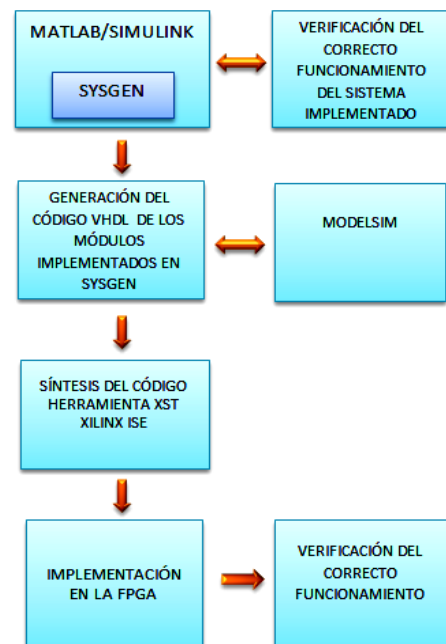


Figura 2. Flujo de diseño.

Para el desarrollo de las prácticas de laboratorio se utiliza el flujo de diseño que aparece en la Fig. 2. Este le permite a los alumnos guiar su actuación durante la actividad de aprendizaje

para la implementación de los módulos creados en SysGen en la FPGA.

### V. DIAGRAMA EN BLOQUES DE LA CAPA FÍSICA WIRELESSMAN-OFDM DEL ESTÁNDAR IEEE 802.16D

En la Fig.3 se presenta la capa física WirelessMan-OFDM del estándar IEEE 802.16d implementada utilizando Simulink y SysGen. Esta capa física utiliza 256 subportadoras, las cuales se asignan de la forma siguiente: 192 subportadoras son para los datos, 56 son subportadoras nulas usadas como bandas de guarda, 28 al inicio y 27 al final, y una central como frecuencia DC; y 8 subportadoras para pilotos. El sistema de bloques es dividido en tres secciones principales: el transmisor, el receptor y el canal. A continuación se realiza un acercamiento a los bloques que integran el modelo desarrollado.

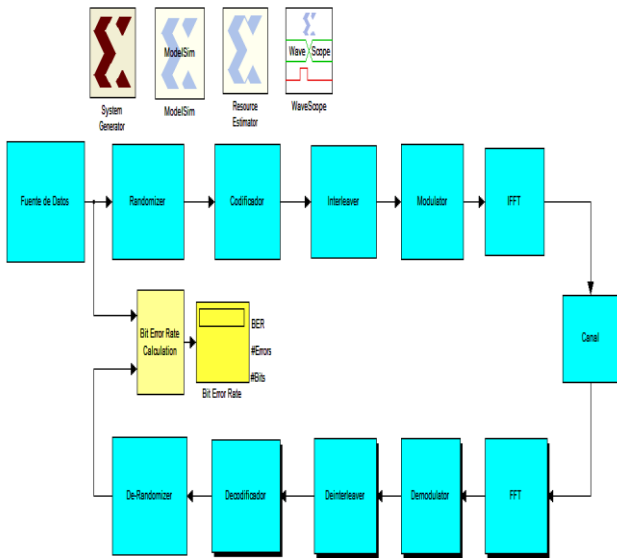


Figura 3. Capa Física WirelessMan-OFDM del estándar IEEE 802.16d.

#### A. Randomizer

Es un mecanismo de prevención de errores implementado en los sistemas de transmisión digital. El Randomizer se realiza sobre cada ráfaga de datos, tanto en el DL como en el UL. El generador de Secuencia Binaria Pseudo-Aleatoria (PRBS) usado para la aleatorización se muestra en la Fig. 4. Los datos provenientes del randomizer son enviados al codificador, que es el encargado de añadir los bits de redundancia, de acuerdo con la tasa de codificación interna.

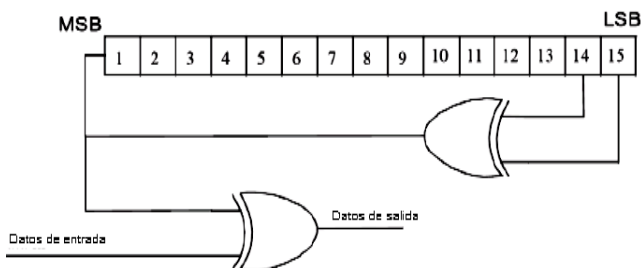


Figura 4. PRBS para aleatorización de datos. [7].

#### B. Codificador Reed Solomon

El codificador Reed Solomon (RS) opera de la siguiente forma: el codificador toma  $k$  bytes de información y añade bytes de paridad para obtener una palabra de código de  $n$  bytes. Un decodificador puede corregir hasta  $t$  bytes errados por palabra de código, donde  $t = ((n-k))/2$ . Un código RS y sus variables  $n$ ,  $k$  y  $t$  puede escribirse como un vector de la siguiente forma RS (32, 24, 4), lo cual indica que es un código RS con una palabra de código,  $n = 32$  bytes, de los cuales son bytes de información  $k = 24$ , y puede corregir hasta  $t = 4$  bytes de error. En la Tabla III aparecen las especificaciones del código RS para esta capa física.

TABLA III. CODIFICACIÓN DEL CANAL POR MODULACIÓN

Modulación	Tamaño del bloque sin codificar (bytes)	Tamaño del bloque codificado (bytes)	Razón de codificación	Código RS
BPSK	12	24	1/2	(12,12,0)
QPSK	24	48	1/2	(32,24,4)
QPSK	36	48	3/4	(40,36,2)
16QAM	48	96	1/2	(64,48,8)
16QAM	72	96	3/4	(80,72,4)
64QAM	96	144	2/3	(108,96,6)
64QAM	108	144	3/4	(120,108,6)

#### C. Codificador Convolutivo

El código convolutivo es un código lineal. Se utiliza para mapear  $k$  bits de información dentro de la palabra de código de  $n$  bits. La implementación de este tipo de código da una codificación de forma continua, donde la secuencia de bits codificados depende de los bits actuales y de los bits previos. En la Fig. 5 está la representación de un codificador convolutivo de tasa  $1/2$ , con los polinomios generadores:  $G1=171_{oct}$ , para la salida X, y  $G2=133_{oct}$ , para la salida Y.

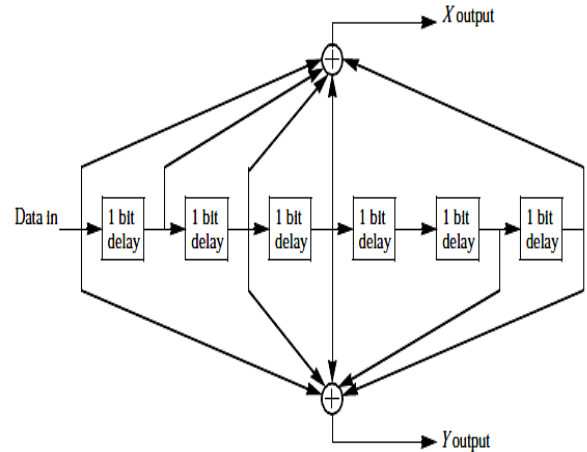


Figura 5. Codificador Convolutivo de Razón  $1/2$ [7]

#### D. Puncturing

Después de la codificación se remueven algunos de los bits de paridad, este proceso es conocido como puncturing. El patrón de puncturing sirve para adaptar la tasa de los canales de transporte a la velocidad binaria disponible en los canales

físicos. En algunos sistemas este patrón es sustituido por un patrón de repetición con el mismo fin. Los patrones de puncturing y orden de señalización que son usados para realizar diferentes tasas de codificación se definen en el estándar.

**E. Interleaver**

El interleaving se define por una permutación de dos pasos. La primera asegura que los bits codificados adyacentes sean destinados a subportadoras no adyacentes. La segunda permutación asegura que los bits codificados adyacentes sean destinados, alternativamente, en bits menos o más significativos de la constelación, evitando así que la fiabilidad de los datos baje demasiado.

**F. Modulación**

Los esquemas de modulación usados son BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM. De ellos BPSK y QPSK fueron implementados utilizando SysGen para su posterior implementación en una FPGA de Xilinx.

En la modulación BPSK son posibles dos fases de salida para la portadora con una sola frecuencia. Una fase de salida representa un 1 lógico y la otra un 0 lógico. Conforme la señal digital de entrada cambia de estado, la fase de la portadora de salida se desplaza entre dos ángulos que están desfasados 180°. En la Fig. 6 aparece su simulación utilizando SysGen.

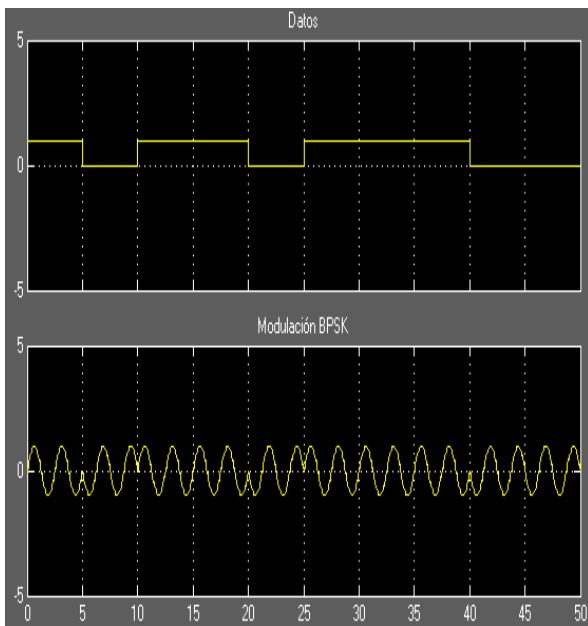


Figura 6. Simulación de la modulación BPSK utilizando SysGen.

La modulación por cambio de fase en cuadratura (QPSK) está conformada por dos moduladores BPSK combinados en paralelo. En esta modulación hay cuatro fases en las que se representan los dígitos 00, 01, 11, 10; donde cada fase transmite dos bits. En la Fig. 7 se muestra el módulo implementado usando SysGen.

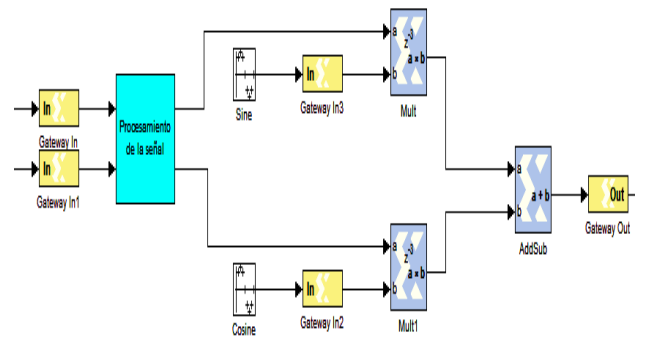


Figura 7. Módulo QPSK desarrollado con SysGen.

En la modulación de amplitud en cuadratura (QAM) la información está contenida tanto en la amplitud como en la fase de la portadora. En la modulación 16QAM hay dieciséis fases (Fig. 8) y se representan los dígitos 0000, 0001, 0010, 0011, 0100, 0101, 0110, 0111, 1001, 1010, 1011, 1100, 1101, 1110, 1111; donde cada fase transmite cuatro bits.

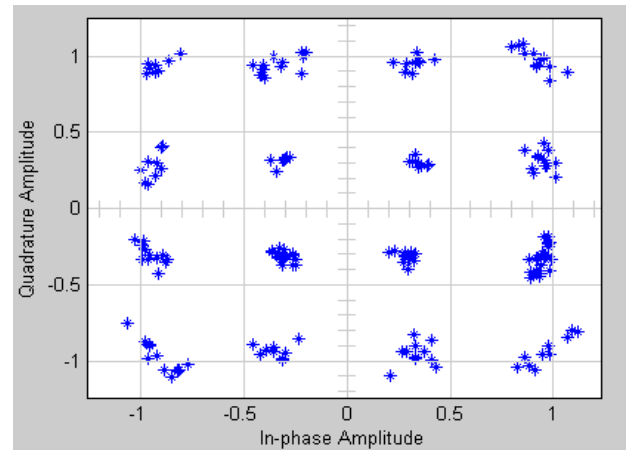


Figura 8. Constelación del modulador 16QAM.

El modulador 64QAM es una extensión del concepto anterior con 6 paquetes de datos en paralelo en lugar de 4. La Fig. 9 muestra la distribución de códigos en cada fase con 64 combinaciones de bits.

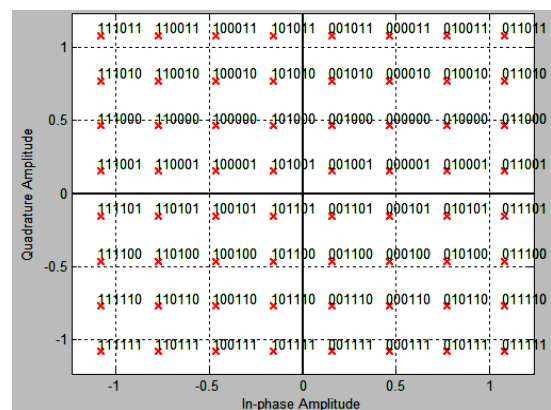


Figura 9. Distribución de códigos en la modulación 64QAM.



### G. Transformada Rápida Inversa de Fourier (IFFT)

Esta operación es utilizada para la transformación de los datos del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo. Es usada para generar símbolos OFDM. IFFT es definida por la siguiente ecuación [13]:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k)W^{-nk}, k = 0,1,\dots \quad (1)$$

### H. Canal y Receptor

El receptor realiza básicamente las mismas operaciones que el transmisor, pero en orden inverso. El modelo del canal usado es el de ruido blanco gaussiano (AWGN).

## VI. IMPLEMENTACIÓN EN LA FPGA

Para la implementación de los módulos desarrollados en SysGen se utiliza el flujo de diseño que aparece en la Fig. 2. Se utilizan dispositivos externos para la comunicación con la FPGA como son los convertidores análogo-digital y digital-análogo. El kit Nexys2 de Digilent, el cual posee una FPGA XC3S500E Spartan-3E de Xilinx es uno de los dispositivos que se usa (Fig. 10).



Figura 10. NEXYS2 Spartan 3E Kit.

## VII. PRÁCTICAS DE LABORATORIO ELABORADAS

Las prácticas de laboratorio sobre la capa física se concibieron como parte de la formación de los alumnos en la carrera de Telecomunicaciones y Electrónica. Ellas se encuentran ubicadas en la asignatura de Fundamentos de las Comunicaciones III. Están estructuradas en dos grupos. En el primero se introducen las características principales de la tecnología WiMAX y los alumnos se familiarizan con los software mencionados anteriormente y los FPGAs de Xilinx. El segundo grupo contiene prácticas donde los alumnos tienen que usar todo el conocimiento que han aprendido durante el primer grupo de prácticas, junto con otros conocimientos adquiridos durante la carrera, para solucionar los problemas propuestos.

Las prácticas se realizan en los laboratorios especializados interactuando con el modelo confeccionado en Simulink y se hace la descarga de los módulos implementados en SysGen en la FPGA, analizando los resultados. Los estudiantes comprueban el funcionamiento de los módulos de la capa física WirelessMan-OFDM al compararlos y validarlos con lo que indica el estándar e investigadores prestigiosos del tema.

## VIII. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta el desarrollo de prácticas de laboratorio relacionadas con la capa física WirelessMan-OFDM del estándar de la IEEE 802.16d. Dichas prácticas contribuyen a que los alumnos adquieran conocimientos sobre la tecnología WiMAX. Además, los estudiantes pueden experimentar con el modelo simulado, lo cual les brinda un mejor aprendizaje de los conocimientos teóricos recibidos sobre los fundamentos de las comunicaciones en asignaturas de la carrera de Telecomunicaciones y Electrónica. Se evidencia que los FPGAs son una alternativa válida para la implementación de funciones del procesamiento de las señales de las capas físicas en sistemas de comunicación inalámbricos. Se manifiestan las ventajas que brinda SysGen y Simulink para la confección de sistemas complejos de las comunicaciones.

## REFERENCIAS

- [1] M. A. Kadhim and W. Ismail, "Implementation of WIMAX IEEE 802.16e Baseband Transceiver on Multi-Core Software Defined Radio Platform," *International Journal of Computer Theory and Engineering*, vol. 2, pp. 1793-8201, 2010.
- [2] J. Mitola, "Software radios-survey, critical evaluation and future directions," presented at the IEEE National Telesystems Conference, 1992.
- [3] A. Marwanto, M. A. Sarijari, N. Fisal, S. K. S. Yusof, and R. A. Rashid, "Experimental Study of OFDM Implementation Utilizing GNU Radio and USRP - SDR," presented at the IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications, 2009.
- [4] M. S. Naghmash, "FPGA Implementation of Software Defined Radio Model based 16QAM," *European Journal of Scientific Research*, vol. 35, pp. 301-310, 2009.
- [5] J. Hwang, B. Milne, N. Shirazi, and J. Strooner, "System level tools for DSPs in FPGAs."
- [6] MathWorks. (2011). MATLAB. Available: <http://www.mathworks.com>
- [7] I. S. 2004, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems," ed, 2004.
- [8] I. S. 2001, "IEEE Std. 802.162001 IEEE Standard for Local and Metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems," 2001.
- [9] I. S. 802.16e-2005, "Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems. Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands," 2005.
- [10] Xilinx. (2010). System Generator for DSP. Available: <http://www.xilinx.com>
- [11] Xilinx. (2011). ModelSim. Available: <http://www.xilinx.com>
- [12] Xilinx. (2010). XST User Guide. Available: <http://www.xilinx.com>
- [13] K. A. B. KADIRAN, "Design and Implementation of OFDM Transmitter and Receiver on FPGA Hardware," *Master of Electronics and Telecommunication, Electrical Engineering, Malaysia*, 2005.



**Yakdiel Rodríguez-Gallo Guerra**  
Graduado con título de oro como Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas en el 2009, Cuba. Actualmente está terminando la Maestría en Telemática. Es profesor

del Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica desde el 2009 en dicha Universidad. Sus principales investigaciones son en el campo de los circuitos reconfigurables y en los circuitos digitales de comunicación.



**Carlos Roche Beltrán.** Profesor Titular del Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV). Cuba. Cuenta con 20 años de experiencia en la docencia de asignaturas de la

disciplina Electrónica. Posee los siguientes títulos: Ingeniero Electrónico, UCLV, 1992; Máster en Ingeniería Electrónica, UCLV, 1999; Doctor en Ciencias de la Educación, Universidad de Oviedo, España, 2005.



**Juan Pablo Barrios Rodríguez**  
Ingeniero Electrónico graduado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, en 1984. Graduado del “First Regional Course on Advanced VLSI Design Techniques” de la Universidad de Trieste, en 1996. Máster en

Electrónica por la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, en 1996. Doctor en Ciencias Pedagógicas, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, en 2006. Profesor de Electrónica Digital y Diseño Digital VLSI en dicha universidad por más de 25 años. Actualmente Decano de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.