

## NOTA TÉCNICA

## ENTORNO DE SIMULACIÓN PARA SISTEMAS DE COMUNICACIONES INALÁMBRICOS DE ALTA CAPACIDAD USANDO MATLAB

**Candotti, Keila M<sup>1</sup> Mavares, Dimas T<sup>2</sup>.**

(Recibido diciembre 2011, Aceptado mayo 2012)

<sup>1</sup> Dpto. de Ingeniería de Ingeniería Electrónica. UNEXPO Vicerrectorado Barquisimeto

<sup>2</sup> Egresada de la Maestría en Ingeniería Electrónica, UNEXPO

keilacandotti@gmail.com, dimasmt@yahoo.es

---

**Resumen:** En este artículo, se presenta un entorno de simulación desarrollado para un sistema MIMO multiportadora y de portadora única. El entorno permite simular el proceso de banda base de sistemas que involucren técnicas de acceso a la capa física tales como CDMA, OFDMA y técnicas de diversidad en transmisión como OSTBC y V-BLAST. Es posible incluir distintas técnicas de modulación, codificación de canal, multicanalización y técnicas de acceso múltiple. Mediante la interfaz de usuario del programa, se puede observar gráficamente el rendimiento del sistema a través de la curva de la tasa de bits errados (BER) en relación a la energía de bit por densidad de ruido (Eb/No). Como medio de validación de la herramienta, se compararon las simulaciones con resultados publicados en la literatura para SC-CDMA, sistemas de multiplexación espacial y sistemas OFDM, encontrando buena correspondencia.

**Palabras clave:** Sistemas de Comunicaciones/ MIMO/ OFDM/ CDMA/ Simulación de Sistemas de Comunicaciones.

---

## SIMULATION ENVIRONMENT FOR HIGH CAPACITY WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS USING MATLAB

---

**Abstract:** In this paper, a simulation environment for multicarrier and single carrier MIMO systems is presented. The environment allows simulating the baseband stage of systems involving physical layer access techniques, such as CDMA and OFDMA, and transmitting diversity techniques, such as OSTBC and V-BLAST. It is possible to include different modulation techniques, as well as channel coding, multiplexing and multiple access techniques. Through the GUI, graphical results are shown in terms of bit error rate (BER) against bit energy per noise (Eb/No). As validation of the tool, simulations were compared with results available in the literature for SC-CDMA, spatial multiplexing, and OFDM systems, finding a good correspondence.

**Keywords:** Communication Systems/ MIMO/ OFDM/ CDMA/ Simulation of Communication Systems.

---

### I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicaciones inalámbricos tienen características particulares dependiendo de la técnica de acceso que usen, el ancho de banda, la frecuencia de operación y el uso o no de diversidad, entre otros aspectos. En el caso particular de las comunicaciones inalámbricas, tanto los sistemas de 3G (tercera generación) como los de 4G (cuarta generación), son exigentes en cuanto a satisfacer los requerimientos de alto volumen de información. Para lograr este objetivo, es imprescindible aprovechar los recursos de tiempo y ancho de banda. Las técnicas de acceso al medio, de multiplexación espacial y de múltiples entradas y salidas (MIMO) a través del uso de múltiples antenas en transmisión y en recepción, juegan un papel fundamental

en alcanzar las capacidades requeridas por los sistemas 4G.

La simulación de sistemas es una importante herramienta utilizada para la caracterización y análisis de los procesos en diferentes disciplinas de la ingeniería. Esta estrategia permite hacer investigación con relativamente pocos equipos y materiales, además le brinda la oportunidad al investigador de alcanzar un alto nivel de comprensión acerca del sistema simulado. Con respecto a los sistemas de comunicaciones, permanentemente se desarrollan nuevos entornos de simulación [1][2][3]. En el contexto de los sistemas de comunicaciones inalámbricas, la complejidad de las técnicas de acceso como CDMA (acceso múltiple por división de código) requiere disponer de herramientas que simulen su comportamiento, como en [4], en donde se presenta un simulador que implementa

diversos tipos de modulación para diferentes sistemas CDMA, utilizando códigos de esparcimiento como ortogonales. Por otra parte, el uso de múltiples antenas transmisoras y receptoras ofrece la posibilidad de obtener altas tasas de transmisión con respecto a un sistema de antena única. En este contexto, en [5] se simula el rendimiento de la técnica de multiplexación espacial V-BLAST (espacio tiempo de capas verticales de la Bell Labs) a través del algoritmo descrito en [6], para ocho antenas transmisoras y doce antenas receptoras logrando mejorar la eficiencia espectral del sistema.

Para lograr el uso eficiente del espectro en las redes inalámbricas 4G, los sistemas OFDM (multiplexación por división ortogonal de frecuencia) se plantean como la principal alternativa para dar soporte a este tipo de sistemas. Esta tecnología permite la transmisión de datos en subportadoras a diferentes frecuencias, así como la cancelación de la ISI (interferencia entre símbolos) con la adición del CP (prefijo cíclico). En [7] se presenta la simulación de un sistema OFDM bajo el estándar IEEE 802.16, implementando Matlab®. Se utiliza inserción de pilotos, inserción de guardas y la adición de prefijo cíclico, se modela la fuente de datos, el modulador/transmisor OFDM, el canal multitrayecto, el demodulador/receptor OFDM y se realiza la medición de la BER.

En el contexto de los sistemas de comunicaciones, algunos componentes se pueden simular utilizando el toolbox de comunicaciones de Matlab®. Sin embargo, para considerar sistemas más complejos, se requiere la programación de otras funciones adicionales. En este trabajo se presenta un entorno de simulación bajo Matlab® para sistemas OFDM, sistemas CDMA, sistemas con multiplexación espacial V-BLAST y sistemas MIMO usando OSTBC (código ortogonales espacio-tiempo por bloques). La herramienta permite la simulación del proceso de banda base utilizando distintas técnicas de modulación, codificación de canal, multicanalización y acceso múltiple. Desde la interfaz de usuario o desde el command window de Matlab® se puede observar gráficamente como es el rendimiento de determinado sistema a través de la curva de la BER en relación a  $E_b/N_0$ .

El presente artículo se organiza como sigue. En la siguiente sección se presenta el desarrollo del trabajo, el cual se divide en apartados. En el apartado 1 se describen las tecnologías implementadas en la simulación. En el apartado 2, se establece la metodología a seguir para realizar las simulaciones, dentro de la misma se definen los sistemas a estudiar. En el apartado 3 se presenta el resultado de las simulaciones a través de las curvas de la BER respecto a  $E_b/N_0$  para los diferentes sistemas. Finalmente, en la sección III se presentan las conclusiones.

## II. DESARROLLO

### 1. Aspectos Teóricos

#### 1.1. Acceso Múltiple por División de Código:

La técnica CDMA es una tecnología digital de transmisión que permite a un número de usuarios acceder a un canal de radiofrecuencia, asignando un código diferente a cada usuario. La capacidad del sistema dependerá de muchos factores. Cada dispositivo que utiliza CDMA está programado con un pseudocódigo, el cual se usa para extender una señal de baja potencia sobre un espectro de frecuencias amplio. La estación base utiliza el mismo código para desensanchar y reconstruir la señal original. Los códigos asociados a otros usuarios permanecen extendidos, indistinguibles del ruido de fondo.

Dentro de la tecnología CDMA, existen dos familias de códigos ampliamente empleadas, los códigos PN (pseudoaleatorios) y los códigos ortogonales. Los códigos PN son secuencias pseudoaleatorias generadas por un registro de desplazamiento realimentado. Los más utilizados se generan a través de un registro de desplazamiento de línea. Las secuencias Walsh son los códigos ortogonales más comúnmente utilizados para el ensanchamiento del espectro y para la separación de canales o de usuarios en sistemas W-CDMA [8].

#### 1.2. Multiplexión Ortogonal por División de Frecuencias

OFDM es una técnica que consiste en enviar la información modulada sobre un conjunto de portadoras de diferentes frecuencias. Normalmente se realiza el procesamiento correspondiente a OFDM tras pasar la señal por un codificador de canal con el objetivo de corregir los errores producidos en la transmisión. Debido al problema técnico que supone la generación y la detección en tiempo continuo de los cientos de portadoras equiespaciadas que forman una palabra OFDM, los procesos de modulación y demodulación se realizan en tiempo discreto mediante la IDFT (Transformada Inversa de Fourier Discreta) y la DFT (Transformada de Fourier Discreta) respectivamente.

En OFDM, la data se distribuye sobre un generalmente largo número de portadoras que son espaciadas en determinados rangos de frecuencias. Este espaciado provee la ortogonalidad en esta técnica, al permitir la recepción de cada subportadora sin interferencia por parte de las restantes subportadoras. En la Figura 1 se muestra un diagrama de bloques de un sistema OFDM. En el transmisor, la señal es definida en el dominio de la frecuencia. Cada portadora OFDM corresponde a un elemento del espectro de la transformada de Fourier.

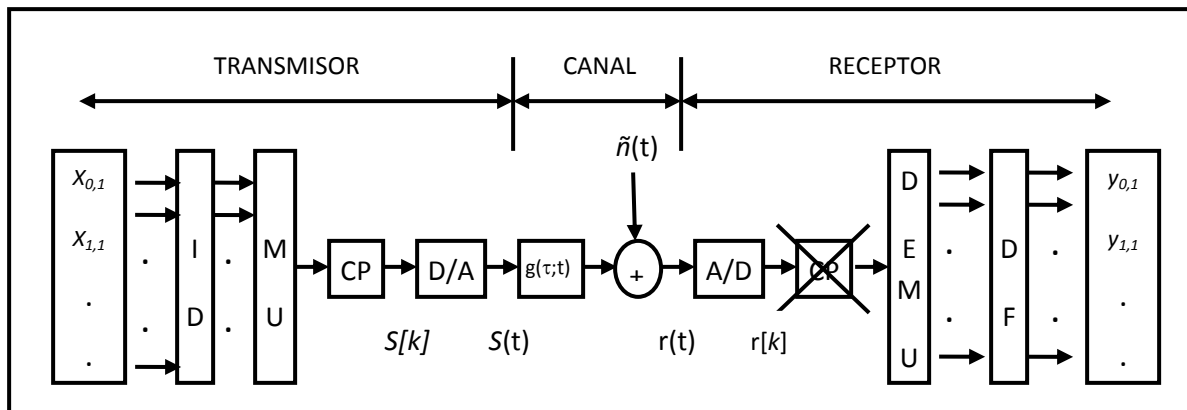


Figura 1. Diagrama esquemático de un sistema OFDM.

Con el objetivo de evitar la interferencia íntersimbólica causada por la dispersión de retardo del canal multitrayecto, se introduce un intervalo de guarda. En el receptor se utiliza un ecualizador para corregir las variaciones de amplitud y fase introducida por el canal.

El intervalo de guarda puede consistir de información nula, es decir, de ausencia de señal. En ese caso, sin embargo, es posible que se genere el problema de una interferencia entre portadoras (ICI). La ICI es un tipo de interferencia generada por una subportadora sobre alguna otra subportadora. En presencia de ICI, la señal OFDM puede perder la ortogonalidad entre subportadoras. Para evitar tanto la ICI como la ISI, el intervalo de guarda se obtiene extendiendo cíclicamente la palabra OFDM en el periodo de guarda [9].

### 1.3. Multiplexación espacial

Foschini et. al. [6] propusieron el uso del multiplexación espacial mediante la arquitectura espacio-tiempo por capas de la Bell Labs (BLAST) para explotar los sistemas de múltiples antenas. El objetivo de la técnica de multiplexación espacial, a diferencia de la codificación espacio-temporal, es maximizar la tasa de transmisión, es decir, la eficiencia espectral. En esta técnica se transmiten flujos de información independientes por cada antena, ocupando todos ellos el mismo ancho de banda y el mismo "slot" temporal. Gracias a la decorrelación entre canales producida por el multicamino y al conocimiento del canal en el receptor, es posible separar los distintos flujos de información. Así en un sistema  $M \times N$ ,  $M$  símbolos independientes se transmiten simultáneamente en un periodo de símbolo, luego la tasa del código para una longitud de trama unitaria es  $M$ .

### 2. Materiales y Métodos:

Como primer paso del procedimiento establecido, se realizó una revisión del toolbox de comunicaciones de Matlab®. Como resultado, se obtuvo un listado de funciones ya disponibles utilizables en el proyecto, como por ejemplo:

- **randint**: generación de números aleatorios.
- **normrnd**: genera vectores o matrices con una distribución normal.
- **convenc**: código convolucional.
- **poly2trellis**: genera la estructura trellis a partir del polinomio generador que utiliza la función **convenc** para codificar.

A continuación, se definieron los sistemas a simular con sus respectivos diagramas de bloques y de flujo: SISO (única entrada – única salida) de portadora única, SISO-OFDM, MIMO-OFDM con códigos ortogonales espacio-tiempo (OSTBC) y espacio-frecuencia (OSFBC), SISO-CDMA y V-BLAST. Se construyó el código de los programas necesarios para cada bloque de los sistemas mencionados. Para la simulación del canal radio, se construyó una función en lenguaje C como un archivo ejecutable de Matlab® para obtener la convolución de la señal transmitida con la respuesta impulsiva del canal multitrayecto variante en el tiempo. Posteriormente, se diseñó una interfaz de usuario que permite ejecutar el programa de una forma amigable.

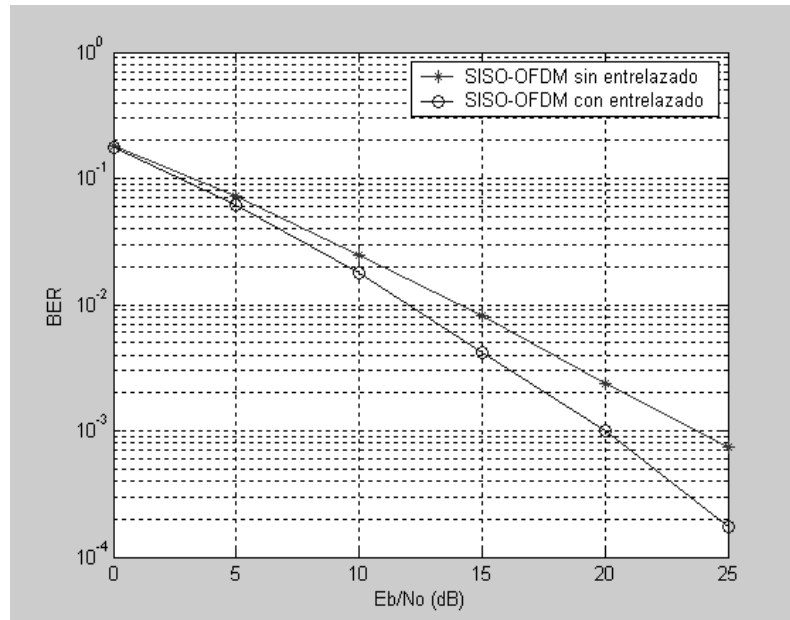
### 3. Resultados y discusión

El entorno de simulación aquí presentado permite estudiar sistemas SISO de portadora única, SISO-OFDM, SISO-CDMA, V-BLAST y MIMO-OFDM con OSTBC y OSFBC, donde se implementó específicamente el código de Alamouti y el código ortogonal esporádico de tasa  $\frac{3}{4}$  para cuatro antenas transmisoras [10]. En cada uno de estos sistemas, se puede utilizar cualquiera de los siguientes sistemas de modulación: BPSK, QPSK, 8PSK, 16PSK, 16QAM y 64QAM. Como sistema de codificación de canal se puede incluir codificación convolucional. Como canal radio se consideran canales multitrayecto definidos en la literatura, o con perfil potencia – retardo (PDP) definido por el usuario, con la sola limitación de que la estadística de cada multitrayecto obedezca a la distribución de Rayleigh. El ruido aditivo se tomó como blanco. En general, los resultados son presentados a través de curvas de la BER en función de

$E_b/N_0$ , pero es posible utilizar las funciones del entorno para considerar otras figuras de mérito. Adicionalmente, se incluye una rutina asistente al diseño de un sistema OFDM.

A continuación, se presentan los resultados de algunas simulaciones realizadas con el entorno de simulación. El objetivo de esta exposición es la de mostrar algunas de las capacidades y la versatilidad del entorno construido. En la Figura 2 se muestran los resultados de la simulación para un sistema SISO-OFDM sin entrelazado y un sistema SISO-OFDM con entrelazado. Se observa un mejor

rendimiento del sistema cuando se utiliza el entrelazado, notando una disminución de la BER. La simulación se ha realizado con un canal correlado (utilizando un filtro Doppler) con una profundidad del desvanecimiento medida en número de muestras del canal (100 muestras para un intercalado de 100 bits). La profundidad del entrelazado se calcula como el producto de la profundidad del desvanecimiento y el número de bits por símbolo. En este caso, el número de bits por símbolo es igual a uno para modulación BPSK.



**Figura 2. Rendimiento de un Sistema SISO-OFDM sin entrelazado y un SISO-OFDM con entrelazado.**

La implementación de códigos de bloque ortogonales en Matlab se realizó tanto con OSTBC como con OSFBC. En caso de utilizarse dos antenas transmisoras con el código espacio-tiempo de Alamouti, se transmiten dos señales simultáneas desde dos antenas en un periodo de símbolo, en el siguiente periodo de símbolo se transmite las mismas dos señales pero codificadas. La codificación también se puede hacer en espacio-frecuencia pero en lugar de dos periodos de símbolos adyacentes se usarían dos subportadoras adyacentes [11]. En la codificación espacio-tiempo, el canal se mantiene constante durante dos intervalos de tiempo, mientras que en la codificación espacio frecuencia, el canal es constante en dos subportadoras sucesivas. En la figura 3 se muestran los resultados de la simulación para ambos sistemas usando el código de Alamouti. Se observa la misma curva de la BER respecto a  $E_b/N_0$  para ambos tipo de codificación ortogonal en presencia de un canal plano.

En la Figura 4 se muestra el rendimiento de un sistema SISO-OFDM para diferentes longitudes del prefijo cíclico, un sistema CDMA utilizando un receptor RAKE con códigos PN u ortogonales, y un sistema V-BLAST con detección a través de cancelación sucesiva de interferencias con forzado a cero. El canal utilizado para la simulación presentada en esta figura fue un SUI tipo IV de [12] con un  $\tau_{rms}$  (dispersión de retardo) de 1257 ns, típico de ambientes externos. En el caso de los sistemas OFDM, se puede observar que la BER aumenta al reducir la longitud del CP, debido a la introducción de ISI. Se muestran también resultados relativos a un sistema SISO-CDMA utilizando códigos de esparcimiento ortogonales o pseudoleatorios, así como un receptor RAKE, en presencia de ocho usuarios. Se puede observar la variación del rendimiento al utilizar diferentes tipos de códigos de esparcimiento. Adicionalmente, se pueden observar resultados relativos a un sistema V-BLAST con dos antenas transmisoras y cuatro antenas receptoras.

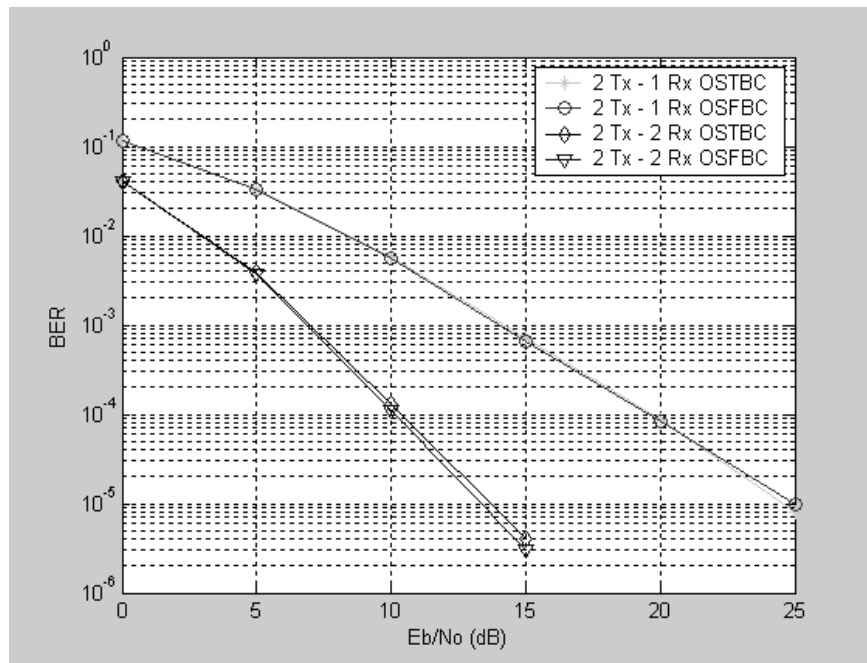


Figura 3. Rendimiento de sistemas MISO y MIMO con OSTBC y OSFBC Alamouti

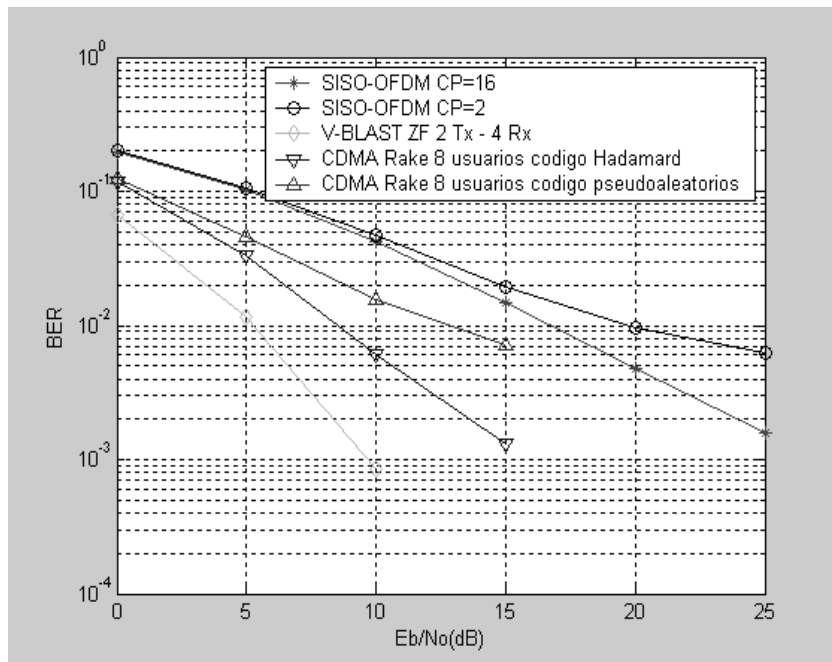


Figura 4. Rendimiento de diferentes tipos de sistemas.

### III. CONCLUSIONES

1. Se construyó un entorno de simulación para sistemas de comunicaciones inalámbricos, multiportadora o de portadora única, con una o más antenas transmisoras o receptoras, el cual permite simular técnicas de modulación, de acceso y de diversidad ampliamente utilizadas en la actualidad.
2. Utilizando esta herramienta, es posible simular sistemas SISO de portadora única, SISO-CDMA, SISO-OFDM, MIMO-OFDM y V-BLAST, tomando como figura de mérito la tasa de bits errados.
3. El entorno de simulación se desarrolló bajo Matlab® y puede ser utilizado en forma de comandos desde la línea de comandos de Matlab® o desde una interfaz

de usuario.

#### IV. REFERENCIAS

1. Tsirakakis, G. and Clarkson, T. **Simulation tools for multilayer fault restoration.** IEEE Communications Magazine, vol 47, issue 3, pp. 128-134. March 2009.
2. Gao Y., Zhang X., Dacheng Y. and Jiang Y. **Unified simulation evaluation for mobile broadband technologies.** IEEE Communications Magazine, vol 47, issue 3, pp. 142-149. March 2009.
3. Kasch, W., Ward, J. and Andrusenko, J. **Wireless network modeling and simulation tools for designers and developers.** IEEE Communications Magazine, vol 47, issue 3, pp. 120-127. March 2009.
4. Barbancho, P. A. y Entrambasaguas, M. J. **Simulador CDMA para comunicaciones móviles.** Trabajo de Grado de Ingeniería. Universidad de Málaga. Ingeniería de Telecomunicación. España. 2000.
5. Yapici, Y. **V-BLAST/MAP: A new symbol detection algorithm for MIMO channels.** Master Thesis. Institute of Engineering and Science of Bilkent University. Turkey. 2005.
6. Wolniansky, P. y Foschini, G. **V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel.** Bell Lab. Tech. J., vol. 1, N. 2, pp. 41-59, 1996.
7. Hasan, M. **Performance evaluation of WIMAX/IEEE 802.16 OFDM physical layer.** Master Thesis. Helsinki University of Technology. Espoo. Finland. 2007.
8. Molisch, F. A. **Wireless Communications.** Editorial John Wiley & Sons. Inglaterra 2006.
9. Van, N. R. y Prasad, R. **OFDM for Wireless Multimedia Communications.** Artech House Editorial. Boston. 2000.
10. Tarokh V., Jafarkhani H., and Calderbank A. **Space-time block coding for wireless communications: performance results.** IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 17, pp. 451-460, Mar. 1999.
11. Mavares, D., and Torres, R. **Space-time code selection for transmit antenna diversity systems.** IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 57, no1, Jan 2008. pp. 620-629.
12. Hari. K. **Interim channel models for G2 MMDS fixed wireless applications.** IEEE 802.16 working group meeting, Tampa FL, Nov 2000.