

# MATERIAL DIDÁCTICO PARA EL ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA CAPA FÍSICA DE WIMAX/IEEE 802.16, USANDO LA INTERFAZ GRÁFICA DE MATLAB (GUI)

Quilumbango Huertas Oscar David, Álvarez Rueda Robin

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional

Quito, Ecuador

[daqui2006@gmail.com](mailto:daqui2006@gmail.com)

[arobin7es@yahoo.es](mailto:arobin7es@yahoo.es)

**Abstract-** El presente trabajo tiene como objetivo el facilitar el entendimiento del cómo trabaja la capa física de WiMAX basándose en el estándar IEEE802.16-2004 también conocido como IEEE802.16d (WiMAX fijo), considerando la opción de transmisión mediante OFDM de 256 subportadoras. El estudio se basa en analizar los diferentes procedimientos realizados a la información por la capa física previo a la transmisión de la señal al canal inalámbrico, procedimientos relacionados a la codificación de canal y modulación OFDM; a si mismo se analiza los procesos utilizados para la recepción de la señal, para posteriormente analizar el desempeño de la capa física frente a los problemas que se presenta en un canal inalámbrico, esto mediante simulación del sistema en Matlab versión 7.6.0 R2008a. El análisis del desempeño del sistema se realiza considerando la tasa de bits errados (BER) variando los parámetros del canal, analizando los resultados mediante curvas de Montecarlo para los diferentes esquemas de modulación y codificación permitidos en el estándar.

## I. INTRODUCCIÓN

WiMAX es una tecnología destinada para redes inalámbricas de área amplia (WMAN), la misma que alcanza grandes coberturas y altas velocidades de transmisión en ambientes NLOS (Sin línea de vista). Su desempeño se basa en una eficiente capa MAC (Capa de acceso al medio) y el uso de técnicas de modulación como OFDM, modulación y codificación adaptiva, turbo códigos, subcanalización, esquemas MIMO y antenas inteligentes en su capa física.

## II. WiMAX

WiMAX está definido en el estándar IEEE 802.16, el mismo que se centra en definir los niveles más bajos (según el modelo de referencia de interconexión de sistemas abiertos, OSI) concretamente la capa física (PHY) y de acceso al medio (MAC).

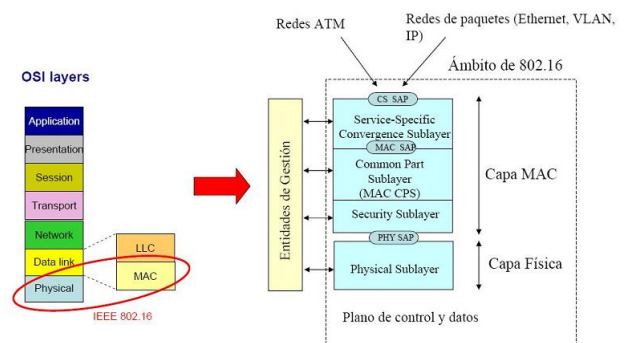


Fig. 1 Estructura de capas de la norma IEEE 802.16.

En cuanto a nuestro estudio y simulación, únicamente nos interesan las especificaciones relativas a la capa física. Por ello, vamos a profundizar en este tema más adelante mientras que sobre la capa MAC solo se hará una descripción superficial.

## III. ARQUITECTURA

Una red WiMAX posee una arquitectura similar a las redes celulares tradicionales, cada celda está compuesto principalmente por una estación base (Base Station, BS) y una o más estaciones suscriptoras (Subscriber Stations, SSs).

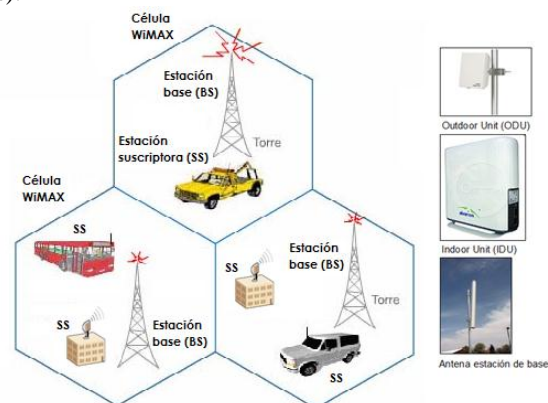


Fig. 2 Arquitectura de Red de WiMAX.

### A. Espectro de frecuencia.

WiMAX puede trabajar a diferentes frecuencias: tanto en frecuencias licenciadas (Licensed), como no licenciadas (Unlicensed).

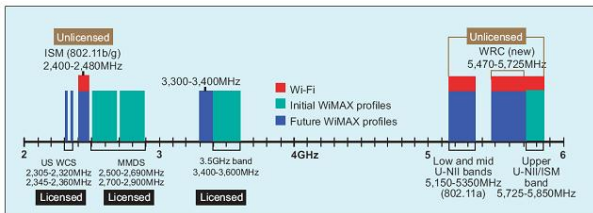


Fig. 3 Espectro utilizado por la tecnología WiMAX y Wi-Fi.

WiMAX es una tecnología que permite anchos de banda desde 1.25 MHz a 20 MHz, sin embargo el WiMAX Forum ha certificado ciertos perfiles de transmisión en los cuales se definen la banda de frecuencia a utilizar, como también el ancho de banda disponible y la técnica de duplexación empleada FDD/TDD.

### B. Capa de acceso al medio, MAC.

La capa MAC se centra en administrar en forma eficiente los recursos de la interfaz de aire. Entre sus funciones se tiene:

- La capa MAC en la estación base es totalmente responsable de la asignación de ancho de banda para todos los usuarios, tanto en el enlace ascendente y descendente.
- Soporta servicios de distintos requerimientos, desde voz sobre IP (VoIP) hasta transmisión de datos sobre IP, con distintos niveles de calidad de servicio (QoS).
- Se encarga del ahorro de energía en los dispositivos portátiles que funcionan con baterías.
- Se encarga de las funciones que tiene que ver con movilidad.
- Soporta esquemas de seguridad.
- Soporta aplicaciones punto a multipunto (PMP) y modelos con arquitectura mesh (malla).

La capa MAC no es objetivo de este proyecto, por lo cual no se profundizará más que esto.

### C. Capa física.

En el estándar se definen varios modos de operación de la capa física, entre los que se tiene:

- **WirelessMAN-SC:** Usa una única portadora situada entre los 10 y los 66 GHz. Requiere condiciones de visión directa (LOS: Line Of Sight).
- **WirelessMAN-SCa:** Usa una portadora pero situada en frecuencias menores a los 11 GHz, y no requiere condiciones de visión directa NLOS.
- **WirelessMAN-OFDM:** Utiliza OFDM y trabaja a frecuencias menores a los 11 GHz lo que permite el uso del sistema en entornos NLOS.
- **WirelessMAN-OFDMA:** Respecto a la WirelessMAN-OFDM, incorpora un sistema de subcanalización. Usa OFDM pero con un aumento de subportadoras utilizables, las cuales siguen por

debajo de los 11 GHz por lo que también se puede usar en condiciones NLOS.

### 1) Técnicas FDD y TDD

Para poder permitir el uso flexible del espectro, las configuraciones de duplexado por división de tiempo (Time Division Duplex, TDD) y duplexado por división de frecuencia (Frequency Division Duplex, FDD) son soportadas en el estándar.

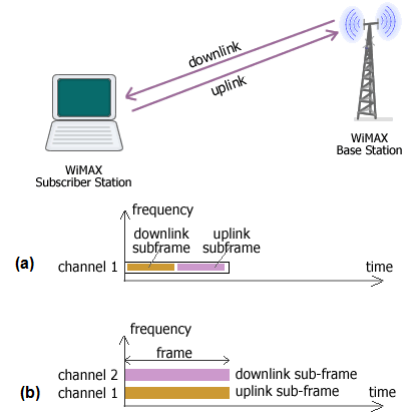


Fig. 4 Modos de Transmisión Duplex (a) TDD y (b) FDD.

Dependiendo del uso de TDD o FDD, la trama se estructura de la siguiente manera:

- En el caso TDD la trama está compuesta por dos subtramas, una downlink y otra uplink, separadas por un intervalo de guarda.
- Si el duplexado es FDD significa que se pueden enviar las dos tramas en bandas de frecuencia diferentes y por lo tanto no es necesaria una estructura determinada de tramas como pasa en TDD.

Para nuestro estudio solo se considera la trama del enlace de bajada en modo FDD, la siguiente figura muestra una estructura resumida de la misma.

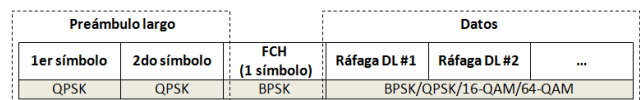


Fig. 5 Subtrama del enlace descendente WiMAX, en formato FDD.

En la subtrama downlink se distinguen tres campos:

- **Preámbulos:** Está compuesto por dos símbolos OFDM, modulados con QPSK, se utilizan con propósitos de sincronización y estimación inicial de canal.
- **FCH (Cabecera de control de trama):** Esta compuesta de un símbolo OFDM modulado con BPSK, la cual contiene información respecto a la configuración de la trama tal como: el esquema de modulación/codificación y las subportadoras utilizables.

- **Datos:** Son una o múltiples ráfagas de datos que son transmitidos con diferentes esquemas de modulación y codificación.

La cantidad de información que puede ser transportada en una trama depende de la duración de la misma, la siguiente tabla muestra los valores permitidos.

TABLA 1  
DURACIÓN DE TRAMA.

Duración de la trama (ms)	Tramas por segundo
2.5	400
4	250
5	200
8	125
10	100
12.5	80
20	50

Dependiendo de la duración de la trama esta transporta más o menos símbolos OFDM para datos. La información de cada símbolo OFDM de la trama, previamente debe pasar por mecanismos que aseguran una señal mucho más robusta frente problemas provocados por el canal inalámbrico, de estos procesos se encarga la capa física, la siguiente figura muestra los procesos realizados en el transmisor como el receptor.

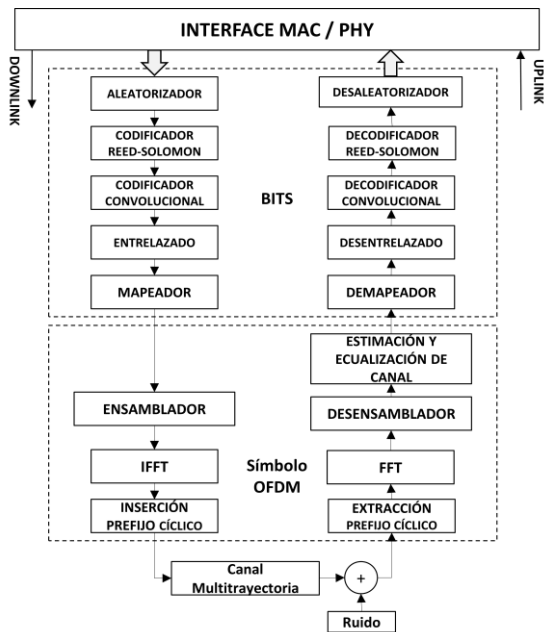


Fig. 6 Diagrama de bloques de la capa física en WiMAX.

## 2) Interface MAC/PHY

Este bloque representa a la información de capas superiores, en este caso tiene por tarea generar los bits necesarios a transmitirse en una trama. El número de bits depende de la cantidad de símbolos OFDM utilizados para datos en la trama y el número de portadoras destinadas para transmitir la información.

## 3) Aleatorizador

Este proceso se aplica a cada conjunto de bits para datos a ser transmitido en un símbolo OFDM, la

aleatorización evita largas secuencias de unos y ceros, consiguiendo con esto una mejor dispersión de la energía y facilitar la recuperación de reloj en recepción. El proceso se basa en combinar la secuencia de bits con una secuencia pseudoaleatoria previamente generada la misma que sigue ciertos parámetros de acuerdo a lo definido en el estándar. El generador para la obtención de la secuencia pseudoaleatoria, es de la forma  $1 + X^{14} + X^{15}$ , como se indica:

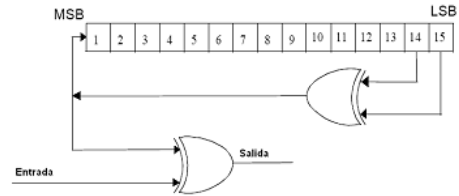


Fig. 7 Registro de aleatorización de los datos.

## 4) Codificador Reed-Solomon

El codificador Reed-Solomon sirve para corrección de errores, este trabaja a nivel de bloque y se especifica como  $RS(n, k, t)$ , el cual procesa un bloque de  $k$  símbolos de datos, en donde cada símbolo está formado por  $m$  bits, a los que agrega redundancia para producir un bloque de  $n$  símbolos codificados, esta redundancia son bits de paridad calculados por el algoritmo de codificación. Existen  $n - k$  símbolos de paridad de  $m$  bits cada uno. Un decodificador puede corregir hasta  $t$  símbolos que contienen errores en una palabra de código, donde  $2t = (n - k)$ . La tasa de codificación es igual a:

$$R_{C_{RS}} = \frac{k}{n}$$

La palabra código Reed-Solomon tiene la siguiente forma:

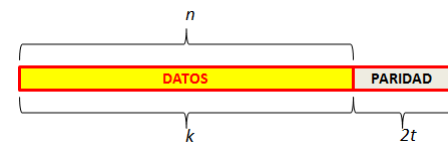


Fig. 8 Palabra de código Reed-Solomon.

Para codificar los bits con esta estructura se debe procesar a través de un circuito digital o un software que opere bajo los fundamentos de campo finito de Galois. En el estándar se emplea un codificador  $RS(255, 239, 8)$  con un campo de Galois igual a  $GF(2^8)$ , con un polinomio primitivo y un generador polinomial igual a:

$$g(x) = (x - \alpha^0)(x - \alpha^1)(x - \alpha^2) \dots (x - \alpha^{2^t-1})$$

$$p(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$$

En el estándar se permite también esquemas de perforado, esta técnica permite lograr diferentes esquemas de codificación partiendo de un solo esquema de codificación  $RS(n, k, t)$ . Con esto se logra codificar bloques de tamaño variable  $\hat{k}$ , con una capacidad de corregir y detectar errores, igualmente variable  $\hat{t}$ . La siguiente figura muestra este proceso.

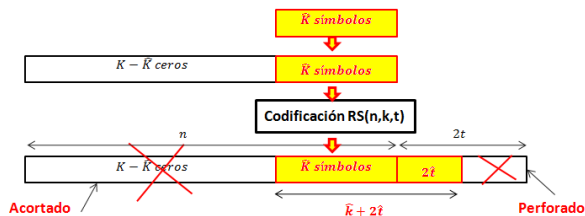


Fig. 9 Proceso de codificación, acortado y perforado.

### 5) Codificador Convolutivo

El codificador convolutivo sirve para agregar redundancia y de esta manera poder corregir errores en recepción, este tipo de codificador trabaja nivel de bit, y consta de un desplazador de registros. Un codificador convolutivo queda especificado por tres parámetros  $(n, k, m)$ , donde:  $n$ , es el número de bits a las salida del codificador;  $k$ , es el número de bits al ingreso del codificador;  $m$ , es la memoria del código o longitud restringida. En donde la relación  $k/n$  es la tasa de código.

$$R_{c_c} = \frac{k}{n}$$

El codificador convolutivo en el estándar parte de un esquema  $(n = 2, k = 1, m = 7)$ , que tiene una velocidad de código de  $R_{c_c} = 1/2$ , y su representación polinomial viene dada en la siguiente expresión:

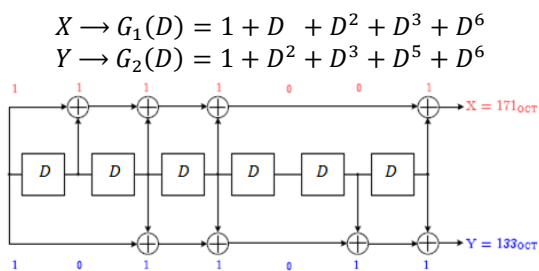


Fig. 10 Codificador Convolutivo  $(2, 1, 7)$ .

El estándar también define procesos de perforado, en donde la idea principal se basa en utilizar un solo codificador convolutivo madre y seleccionar para la transmisión sólo algunos de los datos obtenidos en las salidas X e Y, los cuales son posteriormente convertidos a secuencia en serie:

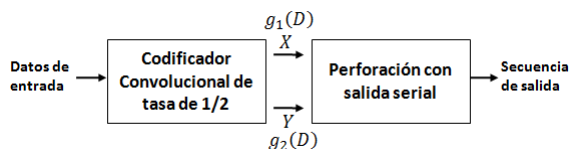


Fig. 11 Perforado en el codificador convolutivo.

La siguiente tabla muestra los patrones de perforado permitidos:

TABLA 2

PATRÓN DE PERFORADO DEFINIDO EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.16-2004.

	Velocidad de Código			
Velocidad	1/2	2/3	3/4	5/6
X	1	10	101	10101
Y	1	11	110	11010
XY	$X_1Y_1$	$X_1Y_1Y_2$	$X_1Y_1Y_2X_3$	$X_1Y_1Y_2X_3Y_4Y_5$

En donde la tasa de codificación de la etapa de FEC es igual a:

$$R_{c_{FEC}} = \frac{R_{c_c}}{R_{perf}} \cdot R_{c_{RS}}$$

La siguiente tabla indica las tasas de codificación con el uso de los códigos Reed-Solomon y Convolutivo por modulación.

TABLA 3

CODIFICACIÓN OBLIGATORIA POR MODULACIÓN SEGÚN EL ESTÁNDAR.

Modulación	Tasa de codificación
BPSK	1/2
QPSK	1/2
QPSK	3/4
16-QAM	1/2
16-QAM	3/4
64-QAM	2/3
64-QAM	3/4

En el estándar se permite también el uso de de códigos BTC (Codificación Turbo en Bloque) y CTC (Turbo Códigos Convolutivos), pero esta característica es opcional y no será simulada en este proyecto.

### 6) Entrelazado

El entrelazado es una técnica de diversidad tanto en tiempo como en frecuencia, esta técnica ayuda a proteger nuestra información contra los llamados errores a ráfagas. Estos errores limitan la capacidad correctora de la etapa de FEC, ya que una palabra código con una serie consecutiva de bits errados supera la capacidad correctora del código. Se vasa en transmitir los bits sobre el canal en un orden distinto al que van a ser interpretados en el decodificador. En el caso de OFDM, existe además la diversidad en frecuencia, donde los bits consecutivos son puestos en distintas portadoras no adyacentes, de tal forma que estos bits experimenten atenuaciones independientes.

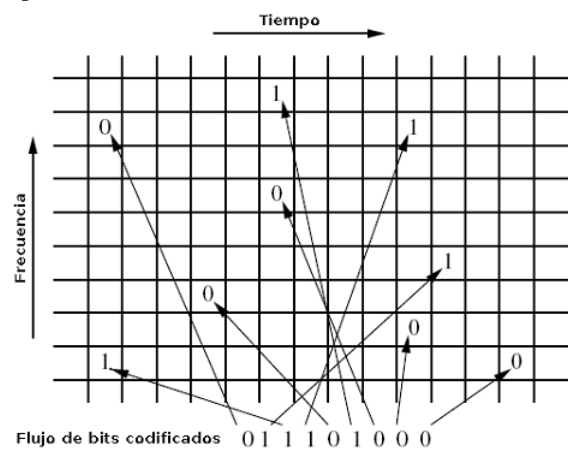


Fig. 12 Posible entrelazamiento en el tiempo y la frecuencia de bits de una palabra código.

El entrelazado es definido en dos pasos de permutación. El primer paso asegura de que los bits

codificados adyacentes se asignan en subportadoras no adyacentes, para ofrecer diversidad de frecuencia y mejorar el rendimiento del decodificador. El segundo paso de permutación se asegura de que los bits codificados adyacentes sean alternativamente asignados sobre los bits menos y más significativos de la constelación de la modulación. La siguiente ecuación define la primera permutación.

$$m_k = \left(\frac{N_{cbps}}{12}\right)k_{mod12} + floor\left(\frac{k}{12}\right), \quad k = 0, 1, \dots, N_{cbps} - 1$$

La siguiente ecuación define la segunda permutación.

$$j_k = s \cdot floor\left(\frac{m_k}{s}\right) + \left(m_k + N_{cbps} - floor\left(12 \cdot \frac{m_k}{N_{cbps}}\right)\right)_{mod(s)}, \quad k = 0, 1, \dots, N_{cbps} - 1$$

En donde:

- $N_{cpc}$ , Bits por subportadora, dependiendo de la modulación utilizada, BPSK, QPSK, 16-QAM o 64-QAM.
- $s = ceil(N_{cpc}/2)$
- $N_{cbps}$ , Bits a transmitir.
- $k$ , índice del bit codificado antes de la primera permutación.
- $m_k$ , índice del bit codificado después de la primera permutación y antes de la segunda permutación.
- $j_k$ , Índice después de la segunda permutación

### 7) Mapeo

Los esquemas de modulación a utilizar debe ser aquellos que no dañen la ortogonalidad de las portadoras, los esquemas permitidos en el estándar son BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM. Una forma de ver este proceso de modulación digital es mediante un diagrama de constelación, con el cual se realiza un mapeo, el cual consiste en asignar un grupo de bits, a un punto de la constelación el cual es número complejo que representa la fase y cuadratura de cada portadora. En el caso de la correspondencia entre los puntos de la constelación y los bits de entrada, suele emplearse una enumeración basada en el código Gray. El código Gray es un sistema de numeración binario en el que dos valores sucesivos difieren solamente en uno de sus dígitos.

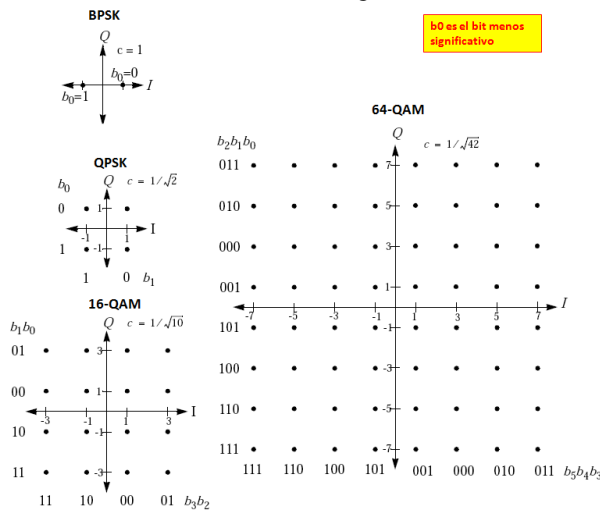


Fig. 13 Diagramas de constelación permitidos en el estándar

Para asegurar una misma distribución de energía se utiliza factores de normalización que aseguren este objetivo. La siguiente tabla resume las modulaciones con sus respectivos factores de normalización.

TABLA 4  
FACTOR DE NORMALIZACIÓN POR MODULACIÓN.

Modulación	Fac. de normalización 'c'
BPSK	1
QPSK	$1/\sqrt{2}$
16-QAM	$1/\sqrt{10}$
64-QAM	$1/\sqrt{42}$

En el estándar se permite que estos esquemas de modulación y codificación cambien dependiendo de las condiciones del canal, a esto se denomina modulación y codificación adaptivas (Adaptive Modulation and Coding, AMC). Este proceso se realiza desde la capa MAC.

### 8) Ensamblador

Este bloque se encarga de formar la estructura del símbolo según el estándar, la siguiente figura muestra esta estructura:

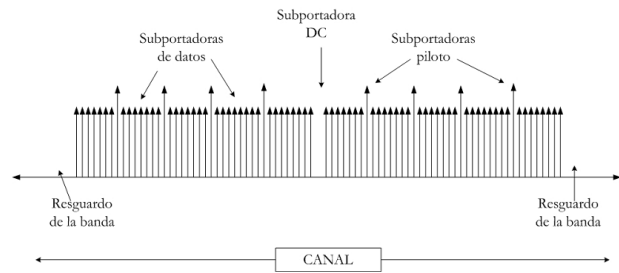


Fig. 14 Estructura del símbolo OFDM en el dominio de la frecuencia (muestra la parte real de un símbolo OFDM con modulación QPSK).

En donde:

- Subportadoras de datos, son de un total de 192 subportadoras, las cuales están moduladas previamente en fase y/o amplitud y se usan para transmitir los datos.
- Subportadoras pilotos, son 8 y están distribuidas por todo el símbolo OFDM, y son utilizadas para propósitos de estimación de canal.
- Subportadoras Nulas, son 56 en total, estas son subportadoras no activas, las cuales no están moduladas y son distribuidas en 55 bandas de guarda y una subportadora DC.

### 9) IFFT

La transformada inversa rápida de Fourier (IFFT), sirve para realizar la modulación OFDM discreta. La modulación por frecuencias ortogonales se basa en transmitir una misma información en varias portadoras, las mismas que tienen que ser ortogonales en frecuencia, en donde la separación en frecuencia entre portadoras es:

$$\Delta f = \frac{1}{T_u}$$

En donde  $T_u$  es el tiempo útil del símbolo OFDM.



El requerimiento del algoritmo IFFT es que el número de portadoras a modular  $N_c$ , sea una potencia de 2. En el caso de que  $N_c$  no sea potencia de dos, se insertan portadoras nulas (o portadoras virtuales) para completar, para calcular el valor potencia de dos más próximo ha  $N_c$  utilizamos:

$$N_{fft} = 2^{\lceil \log_2(N_c) \rceil}$$

En donde  $\lceil x \rceil$ , aproxima al entero superior.

En el estándar se utilizan 200 portadoras útiles entre datos y pilotos, por lo que el resto son portadoras virtuales o nulas, completando un total de 256 valores a ser procesados por la IFFT.

### 10) Inserción prefijo cíclico

La idea del prefijo cíclico es la de asegurar un convolución circular y de evitar la interferencia entre símbolos. El prefijo cíclico se inserta al inicio de cada símbolo OFDM con esto se logra una secuencia periódica, y se puede aprovechar la propiedad de la convolución circular, la cual permite obtener la señal original si se conoce previamente el canal.

$$s[n] \otimes h[n] \xrightarrow{DFT} S[k]H[k]$$

En donde:

$$S[k] = \frac{R[k]}{H[k]}$$

Y por medio de la IDTF, podremos recuperar los datos originales  $s[n]$ .

La longitud de este prefijo cíclico debe ser mayor que el retardo máximo del canal. Con este tiempo extra el tiempo del símbolo OFDM aumenta.

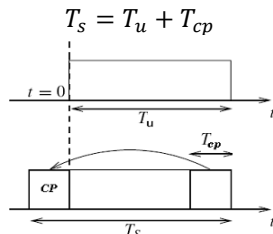


Fig. 15 Intervalo de guarda en un símbolo OFDM.

En el estándar se permiten 4 longitudes de prefijo cíclico, 1/4, 1/8, 1/16 y 1/32 del tiempo útil del símbolo OFDM. Al final de este proceso se tiene la señal OFDM en banda base.

### 11) Canal Inalámbrico

El canal inalámbrico se ha modelado considerando ruido multiplicativo y aditivo.

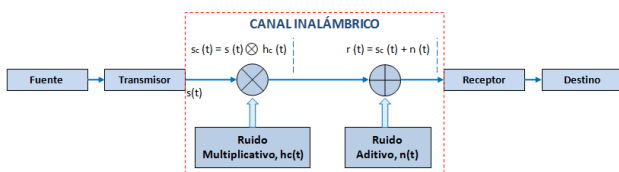


Fig. 16 Ruido multiplicativo y ruido aditivo presentes en el canal.

Ruido Aditivo.- Este efecto se añade a la señal original, y se modela como ruido blanco aditivo gaussiano AWGN, el mismo que tiene una función de distribución de probabilidad (FDP) Gaussiana.

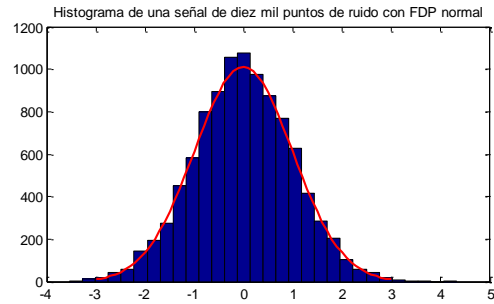


Fig. 17 FDP normal generada para 10000 puntos.

Ruido Multiplicativo.- Se presenta de diferente forma dependiendo del escenario, en nuestro caso se asume un escenario fijo o con poca movilidad. En donde, la señal que sale desde el transmisor, puede llegar hasta el receptor tanto de manera directa (rayo directo) como por reflexiones en los distintos objetos que circundan al receptor y/o al transmisor (rayos reflejados).

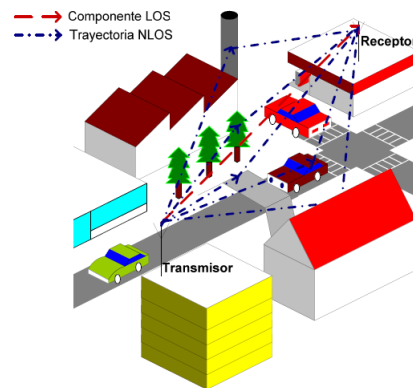


Fig. 18 Escenario de un canal inalámbrico.

Para un escenario con línea de vista (LOS) se utiliza una FDP de Rice y para modelar un escenario sin línea de vista (NLOS) se utiliza una FDP tipo Rayleigh.

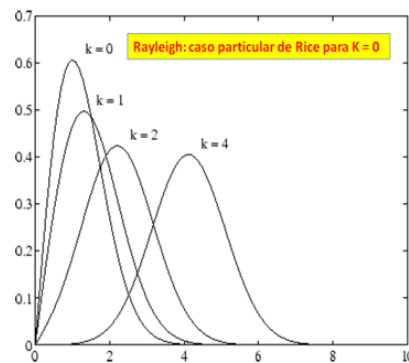


Fig. 19 Familia de FDP riceanas y de Rayleigh.

Para modelar este escenario se utilizan los modelos SUI (Stanford University Interim), los mismos que han sido creados para modelar ambientes fijos o con poca

movilidad. Los modelos SUI parten de un modelado mediante tres rayos ( $L = 3$ ), cada camino es un proceso estocástico con una distribución Rayleigh o Rice de factor  $K$ , una potencia promedio específica, un retardo específico, un máximo desplazamiento Doppler específico y un modelo del espectro Doppler específico ya que al tratarse de un canal pensado para instalaciones WiMAX fijas, este espectro tiene en el desplazamiento cero la mayor concentración de la energía y se denomina como rounded doppler.

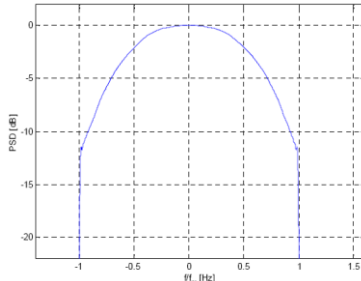


Fig. 20 Modelo PSD Rounded Doppler.

Dependiendo del tipo de antena utilizada, se añade un factor de reducción de ganancia. Por último, también se indica un factor de normalización, que se aplica sobre los coeficientes generados para asegurar que el canal no altere la potencia de la señal transmitida.

TABLA 5  
CARACTERÍSTICAS DEL MODELO SUI-3.

Canal SUI-3 (Considerando una antena omnidireccional)				
	Camino 1 (Tap1)	Camino 2 (Tap2)	Camino 3 (Tap3)	Unidades
<b>Retardo</b>	0	0.4	0.9	$\mu s$
<b>Ganancia</b>	0	-5	-10	dB
<b>Factor K</b>	1	0	0	dB
<b>Doppler</b>	0.4	0.3	0.5	Hz
<b>Factor de normalización:</b> -1.5113 dB <b>Dispersión:</b> $\tau_{RMS} = 0.264 \mu s$	$F_{omni} =$		<b>Tipo de terreno:</b> B, Densidad de árboles baja o densidad de árboles moderada/fuerte.	

### 12) Retiro prefijo cíclico

Los procesos relacionados a la recepción de la señal WiMAX no están especificados en el estándar. Por lo tanto este bloque realiza el proceso contrario al realizado en recepción.

### 13) FFT

Realiza la demodulación OFDM, y es la operación contraria a la IFFT. La FFT al igual que la IFFT trabaja con 256 valores.

### 14) Desensamblador

Retira los datos y pilotos de la estructura del símbolo OFDM.

### 15) Estimación y ecualización

La estimación de canal se realiza con propósitos de ecualización. Para la estimación de canal se utilizan las

portadoras pilotos, conocidas como secuencias de entrenamiento. A más de la portadoras pilotos insertadas en cada símbolo, los preámbulos también se utilizan para estimación de canal, con estos últimos se consigue un estimación perfecta de canal, por el contrario para conseguir una estimación completa de canal mediante las portadoras pilotos se necesita realizar procesos de interpolación en las portadoras no estimadas. El proceso es el siguiente:

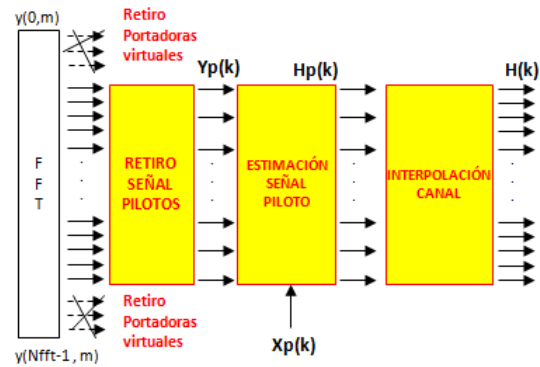


Fig. 21 Proceso de estimación de canal en el dominio de la frecuencia.

La estimación se realiza utilizando el algoritmo de mínimos cuadrados, (Last square, LS), y se define como:

$$\hat{H}_{p,LS}[k] = \frac{Y_p[k]}{X_p[k]}, \quad k = 0, 1, \dots, N_p - 1$$

Donde  $\hat{H}_{p,LS}[k]$  es la respuesta de frecuencia estimada del canal mediante portadoras pilotos,  $Y_p[k]$  es las portadoras pilotos recibidas,  $X_p[k]$  son las portadoras pilotos conocidas y  $N_p$  el número de portadoras pilotos.

### 16) Demapeador

Se encarga de realizar la detección de los bits enviados de acuerdo al símbolo de la constelación recibido. Este procedimiento se puede complicar, ya que cada símbolo fue afectado por distorsiones provocadas por el canal, provocando un error en la posición de cada símbolo en la constelación. Para la detección se utiliza métricas de decisión, en este caso por decisión dura, el cual se basa es dividir el plano complejo de la constelación en regiones de igual tamaño que corresponden a cada punto de la constelación y la salida sería la combinación de bits en donde se encuentra el símbolo recibido.

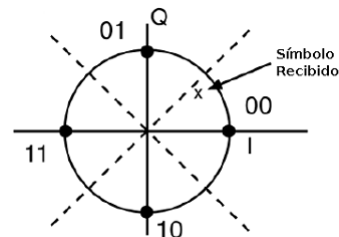


Fig. 22 Demapeo por decisión dura.

### 17) Desentrelazador

El desentrelazado en el estándar, también se define en dos permutaciones. La primera permutación es la inversa de la segunda permutación del entrelazado:

$$m_j = s \cdot \text{floor}\left(\frac{j}{s}\right) + \left(j + \text{floor}\left(12 \cdot \frac{j}{N_{cbps}}\right)\right)_{\text{mod}(s)},$$

$$j = 0, 1, \dots, N_{cbps} - 1$$

La segunda permutación es la inversa de la primera permutación del entrelazado.

$$k_j = 12 \cdot m_j + (N_{cbps} - 1) \cdot \text{floor}\left(12 \cdot \frac{m_j}{N_{cbps}}\right),$$

$$j = 0, 1, \dots, N_{cbps} - 1$$

En donde:

- $N_{cpc}$ , Bits por subportadora, dependiendo de la modulación utilizada BPSK, QPSK, 16-QAM o 64-QAM.
- $s = \text{ceil}(N_{cpc}/2)$
- $N_{cbps}$ , Bits a transmitir.
- $j$ , índice de los bits recibidos antes de la primera permutación.
- $m_j$ , índice después de la primera y antes de la segunda permutación.
- $k_j$ , Índice después de la segunda permutación

### 18) Decodificador convolucional

Realiza la decodificación convolucional, en este caso se aplica el algoritmo de Viterbi, el proceso consiste en buscar un camino en el diagrama de Trellis (o en el árbol

del código) que nos dé la secuencia de bits más probable (si no hay errores obtendremos la secuencia exacta).

### 19) Decodificador Reed-Solomon

La decodificación Reed-Solomon se realiza utilizando los bits de paridad de la palabra código, el decodificador puede corregir hasta  $t$  errores o hasta  $2t$  borrados. Un "borrado" ocurre cuando la posición de un símbolo errado es conocida.

### 20) Desaleatorizador

Se encarga de volver a su forma inicial a los bits antes aleatorizados, el procedimiento es el mismo que realizado en la aleatorización. Se debe realizar la suma módulo dos con la misma secuencia pseudoaleatoria.

## III. INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR

En el simulador se considera los parámetros definidos en el estándar, y para su creación se utiliza la herramienta GUI de Matlab. En el cual se permite realizar las siguientes tareas.

- Modo de visualización continuo.
- Visualización del modo de operación en cada etapa del modem WiMAX.
- Análisis del sistema utilizando el método de Montecarlo.

La ventana principal es la siguiente:

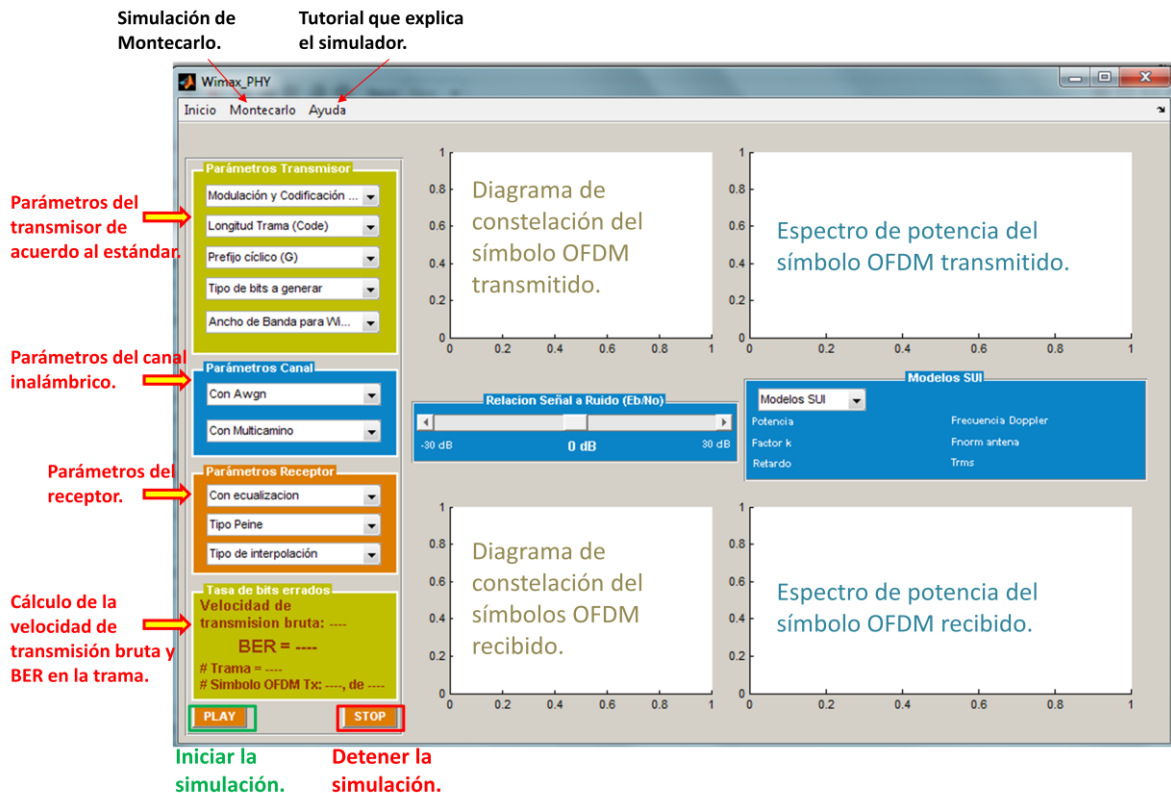


Fig. 23 Ventana principal del simulador de la capa física de WiMAX.



#### IV. RESULTADOS

Para la simulación se ha considerado los parámetros planteados en el estándar, y el análisis del desempeño se

realiza mediante simulación de Montecarlo, calculando la tasa de Bits errados en función de la relación entre la energía de bit y el ruido.

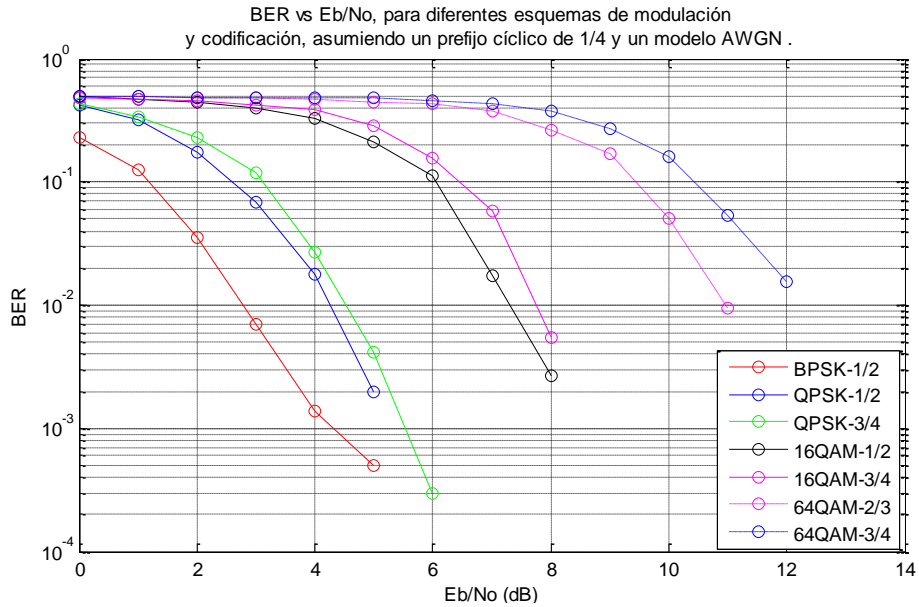


Fig. 24 Curvas de Montecarlo para los 7 esquemas de modulación y codificación, asumiendo un PC = 1/4 y un canal AWGN.

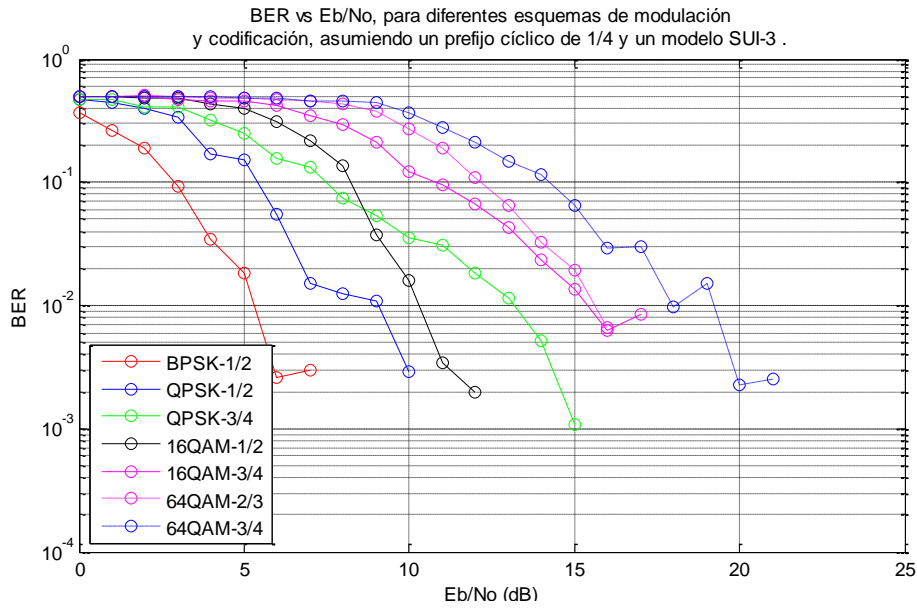


Fig. 25 Curvas de Montecarlo para los 7 esquemas de modulación y codificación, asumiendo un PC = 1/4 y un canal SUI-3.

#### V. CONCLUSIONES

- El hecho de que WiMAX puede proveer tan altas velocidades se debe a como modula la información en la capa física, además de una capa MAC totalmente eficiente. Entre los mecanismos empleados en la capa física por WiMAX están: codificación de canal (7 esquemas permitidos), modulación adaptativa, modulación OFDM, esquemas de transmisión MIMO, sistemas de antenas inteligentes, subcanalización.
- En WiMAX los esquemas de modulación y codificación son utilizados dependiendo de la interferencia que se produzca en la señal, por este motivo para distancias más largas o condiciones de canal más severas, en donde se tiene mayor interferencia se utiliza un esquema de modulación mucho más robusto al ruido como es la modulación BPSK con tasa de codificación de 1/2, sin embargo con el uso de este esquema se obtiene la menor tasa de transmisión, por otra parte para obtener una mayor tasa de transmisión se utiliza el esquema

64QAM-2/3, el uso de este esquema implica tener mejores condiciones de canal.

- La longitud del prefijo cíclico debe ser mayor que el retardo máximo del canal, con el objeto de asegurar una buena ecualización en recepción y evitar el ISI. En las pruebas realizadas se observa que en los casos en donde el tiempo del prefijo cíclico es menor que el retardo máximo del canal se producen BER más altos, en especial en esquemas de modulación más susceptibles al ruido como 16-QAM y 64-QAM, los mismos que presentan tasa de codificación bajas.
- En las simulaciones se obtuvo un menor BER con el uso de los modelos SUI-1, SUI-2 y SUI-3 ya que estos son los menos dispersivos, y sus retardos máximos son más bajos, por otro lado con los modelos SUI-4, SUI-5 y SUI-6 se obtuvo un BER más alto, ya que estos son más dispersivos con retardos máximos más altos, llegando a superar en algunos casos el tiempo del prefijo cíclico.
- La modulación BPSK-1/2 logró un buen desempeño en todos los modelos SUI, llegando alcanzar un BER de cero bajo ciertas condiciones de  $E_b/N_0$ , en las simulaciones en el receptor se utilizó una estimación de canal ideal.

## REFERENCIAS

- [1] Material del curso comunicaciones inalámbricas del Dr. Robin Álvarez Rueda.
- [2] J Carlos Sánchez Sierra, "Diseño e implementación con DSP de un modulador Wimax", <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4507/1/sanchez.pdf>.
- [3] "RF Spectrum Utilization in WiMAX Fujitsu Microelectronics America, Inc. November 2004", [http://www.fujitsu.com/downloads/MICRO/fme/wimax/whitepapers/wpbwaRF\\_wp04.pdf](http://www.fujitsu.com/downloads/MICRO/fme/wimax/whitepapers/wpbwaRF_wp04.pdf)
- [4] "WiMAX Forum™ Regulatory Working Group Initial Certification Profiles and the European regulatory framework – September 2004", [http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/Initial\\_profiles\\_final.pdf](http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/Initial_profiles_final.pdf)
- [5] "Channel Models for Fixed Wireless Applications", [http://www.ieee802.org/16/tga/docs/80216a-03\\_01.pdf](http://www.ieee802.org/16/tga/docs/80216a-03_01.pdf).
- [6] "Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) Tutorial", <http://www.complextoreal.com/chapters/ofdm2.pdf>.
- [7] Muhammad Saad Akram, "Pilot-based Channel Estimation in OFDM Systems, Copyright 2007. Nokia Mobile Phones", [3www2.imm.dtu.dk/pubdb/views/edoc\\_download.../imm5405.pdf](http://3www2.imm.dtu.dk/pubdb/views/edoc_download.../imm5405.pdf).
- [8] "IEEE Standard for Local and metropolitana area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems", <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16.2-2004.pdf>.

## BIBLIOGRAFIA DEL AUTOR

Oscar David Quilumbango Huertas

Nacido en Ibarra-Ecuador el 24 de Septiembre de 1985, en el año 2004 obtuvo el título de Bachiller en Electricidad en el colegio Técnico Superior '17 de Julio'. Egresó en el año 2009 de la carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica Nacional.