



Tecnura

ISSN: 0123-921X

tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co

Universidad Distrital Francisco José de  
Caldas  
Colombia

Ochoa Torres, Elizabeth; Castro Olaya, Manuel Ignacio; Gómez Vargas, Ernesto  
Simulación y análisis del comportamiento del BER y Throughput en capa física de WIMAX  
IEEE 802.16-2004 en ambientes con presencia de AWGN y Rayleigh Fading  
Tecnura, vol. 18, núm. 1, 2014, pp. 135-155  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Bogotá, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257059812012>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica  
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## Simulación y análisis del comportamiento del BER y Throughput en capa física de WIMAX IEEE 802.16-2004 en ambientes con presencia de AWGN y Rayleigh Fading

### Simulation and analysis of the BER performance and throughput in WIMAX physical layer IEEE 802.16-2004 in environments with the presence of AWGN and Rayleigh Fading

Elizabeth Ochoa Torres\*, Manuel Ignacio Castro Olaya\*\*, Ernesto Gómez Vargas\*\*\*

Citation / Para citar este artículo: Ochoa Torres, E., Castro Olaya, M. I., & Gomez Vargas, E. (2014). Simulación y análisis del comportamiento del BER y Throughput en capa física de WIMAX IEEE 802.16-2004 en ambientes con presencia de AWGN y Rayleigh Fading. Revista Tecnura, Edición especial, 135-155.

**Fecha de recepción:** 16 de mayo de 2013 / **Fecha de aceptación:** 7 de marzo de 2014

#### RESUMEN

El estándar de comunicaciones WiMAX IEEE 802.16-2004 está enfocado en dar solución a enlaces de última milla, ya sea para escenarios de enlaces punto a punto, punto multipunto, o topologías de múltiples usuarios móviles conectados a un punto de distribución.

Su correcta implementación depende de los valores de tasa de error de bit (BER) y el rendimiento (*Throughput*); por tanto, una correcta evaluación de la incidencia del ruido blanco gaussiano (AWGN), las múltiples trayectorias (Rayleigh), y desvanecimiento (Fading) sobre las variables de BER y *Throughput* generarán un precedente de evaluación para su aplicación.

Este artículo se ha desarrollado con el objetivo de determinar el comportamiento de WiMAX con el estándar IEEE 802.16-2004 en escenarios controlados con presencia de AWGN y Fading Rayleigh. Para ello, se llevará a cabo la implementación de simulaciones en tres escenarios, los que permitirán

analizar y evaluar su comportamiento ante las variables antes mencionadas.

**Palabras clave:** AWGN, SNR, Fading, BER, Throughput, Rayleigh, OFDM, WIMAX 802.16 – 2004, efecto Doppler.

#### ABSTRACT

The communication standard IEEE 802.16-2004 WiMAX is focused on providing solutions to last-mile links, either for point-to-point scenarios, point-to-multipoint, or multiple mobile users connected to a distribution point topologies.

Its successful implementation depends on the values of bit error rate (BER) and throughput (*Throughput*), therefore; an accurate assessment of the incidence of white Gaussian noise (AWGN), multipath (Rayleigh), and fading (Fading) on BER and Throughput variables will generate a precedent of assessment for its application.

\* Ingeniera en telemática, especialista en teleinformática; especialista técnico en desarrollo de software bancario para Cobiscorp. Bogotá, Colombia. Contacto: [eochoat@correo.udistrital.edu.co](mailto:eochoat@correo.udistrital.edu.co)

\*\* Ingeniero electrónico, especialista en teleinformática. (ITLA) Administrador local de tecnologías de la información en Colombia y (ITEA) Agente escalador de tecnologías de la información para GDF Suez Energy Latin America. Bogotá, Colombia. Contacto: [manuel.castro@gdfsuezla.com](mailto:manuel.castro@gdfsuezla.com)

\*\*\* Ingeniero electrónico, magíster en teleinformática, candidato a doctor en ingeniería, docente de planta, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [egomez@udistrital.edu.co](mailto:egomez@udistrital.edu.co)

This article is developed to determine the performance of the IEEE 802.16-2004 WiMAX standard in controlled environments in presence of AWGN and Rayleigh Fading. In order to do this, three simulation scenarios will be implemented, which will allow

analyzing and assessing its performance under the above-mentioned variables

**Key words:** AWGN, SNR, Fading, BER, throughput, Rayleigh, OFDM, WiMAX 802.16-2004, Doppler Effect.

## INTRODUCCIÓN

WiMAX es una tecnología de gran uso y de última generación que está propagándose actualmente en forma considerable en Europa y en todo el mundo; es un estándar de comunicación inalámbrico de última generación, diseñado para proveer accesos vía radio de alta capacidad a distancias inferiores a 50 kilómetros y con tasas de transmisión de hasta 70 Mbps. (PÉREZ, 2009).

Las soluciones WiMAX se pueden aplicar en multitud de escenarios (enlaces punto a punto, redes metropolitanas, cobertura de hot-spots Wi-Fi, redes empresariales, backbones, entre otros) con alta garantía de disponibilidad y estabilidad; sin embargo, una de las problemáticas más grandes que puede enfrentar WiMAX es la pérdida de la calidad del canal de comunicaciones y su rendimiento por presencia de ruido.

WiMAX enfrenta un gran reto al establecerse como tecnología de última milla inalámbrica, pero su viabilidad de implementación depende de cómo puede asegurar la calidad de la comunicación dado su comportamiento frente a las condiciones ambientales comunes como el ruido, desvanecimiento, interferencias y distorsión.

Para el caso de ambientes con ruido, modelado como ruido blanco gaussiano, y desvanecimiento por múltiples trayectorias, es fundamental simular y encontrar los valores de razón entre la potencia de la señal y la del ruido (SNR), que es un factor determinante sobre la incidencia de la tasa de error de bit (BER) y el rendimiento (*Throughput*), lo que establece la calidad de la comunicación y mide el grado de confiabilidad para la aplicación de esta tecnología.

En la sección 2 del artículo se presentará la metodología a seguir, en la sección 3 se dará una

breve descripción de los conceptos clave en el proceso de simulación y estado del arte de esta tecnología, la sección 4 iniciará con el análisis de las simulaciones para los tres escenarios plantados con sus respectivos resultados, y en la sección 5 se presentarán conclusiones.

## METODOLOGÍA

En la actualidad no se cuenta con herramientas de aprendizaje y simulación de la capa física de WiMAX estándar IEEE 802.16-2004; por este motivo se propone la implementación de un aplicativo o uso de herramientas de simulación.

Para esto se realizó un análisis de las herramientas de laboratorio matemático existentes (entre las estudiadas están Octave y Matlab), y se encontró que Matlab cuenta con herramientas y bloques ya implementados que permiten efectuar el proceso de simulación de manera óptima y más rápida.

Una vez seleccionada Matlab como herramienta de simulación y construido el modelo de simulación del canal de comunicación de capa física con el estándar WiMAX IEEE 802.16-2004, se plantea crear tres escenarios en donde se identifique la transmisión ideal y se ponga a prueba la estructura de transmisión y recepción, aplicando variaciones en el modelo del medio físico del canal con adición de ruido blanco gaussiano con diferentes valores de simulación para el segundo escenario, y en un tercer escenario se adiciona un bloque de fading Rayleigh, en donde se aplican variaciones de frecuencias Doppler para evaluar este efecto con uno de los puntos como equipo móvil.

En los tres escenarios se hacen mediciones de BER y Throughput haciendo comparación de la información original transmitida y la información recibida en receptor con la estructura WiMAX.

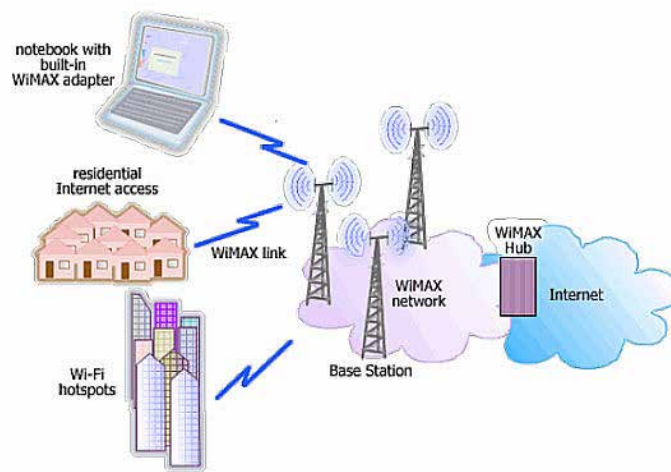
## WIMAX

World wide interoperability for microwave access (WIMAX) es una solución de acceso inalámbrico de banda ancha para servicios de última milla que implementa calidad de servicio (QoS) para ofrecer diversos servicios (Al-Adwany, 2010); este esquema se presenta en la figura 1.

El objetivo de Wimax es complementar al estándar existente conocido como WiFi, ya que Wifi

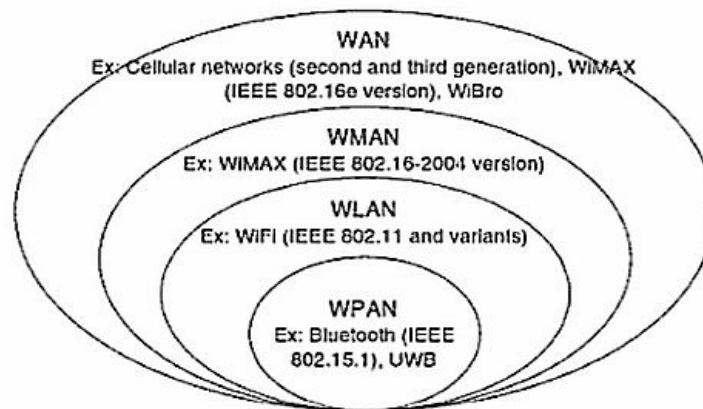
se diseñó con el fin de permitir la creación de redes inalámbricas locales, mientras que WIMAX está concebido para la creación de redes inalámbricas metropolitanas (WMAN).

Entre las características más representativas de WIMAX, encontramos que establecen o formulan un alcance de hasta 7 km para enlaces punto-multipunto sin línea de vista y además presentan un alcance de hasta 50 km en enlaces punto a punto con línea de vista; para este último se cuenta con



**Figura 1.** Visión general del ecosistema WiMAX.

**Fuente:** Tomado de (Cadavieco, 2012).



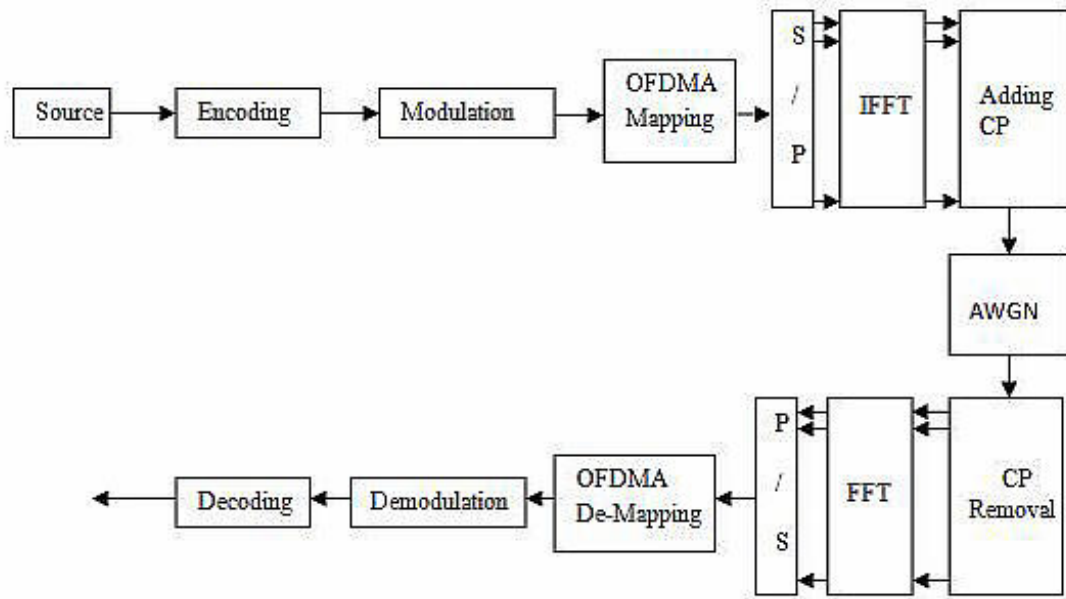
**Figura 2.** Tipos de redes.

**Fuente:** Tomado de (Nuaymi, 2007).

un ambiente sin presencia de obstáculos entre la estación suscriptora, conocida como SS (Subscriber Station), y la estación base llamada BS (Base Station), permitiendo así establecer tasas de transmisión de hasta 70 Mbps.

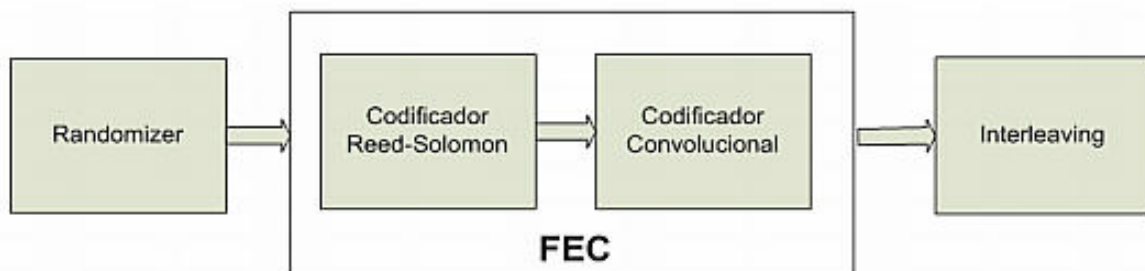
Un aspecto notable de la capa física de Wimax es que implementa para garantizar la comunicación, sistemas de codificación y modulación adaptativa permitiendo tasas de transición variables con base en la calidad de la señal recibida; a mejor señal, mayor tasa de transmisión (PÉREZ, 2009).

### Etapas del estándar WIMAX IEEE 802.16-2004: modelo general



**Figura 3.** Esquema general de bloques de capa física WiMAX 802.16 -2004.

**Fuente:** Tomado de (Jamal Mountassir, 2011 ).



**Figura 4.** Diagrama de bloques codificador de canal.

**Fuente:** Tomado de (José Andrés Marzo Icaza, 2011).

**Etapas de corrección de errores:** Este proceso, como puede observarse en la figura 4, está compuesto por dos bloques; primero implementa un codificador externo Reed-Solomon, y a la salida de este se tiene otro bloque que efectúa un codificador interno Convolutivo. El codificador Reed-Solomon está concebido para corregir errores de ráfaga sobre los bytes, lo cual garantiza efectividad en la corrección de errores en escenarios con presencia de múltiples trayectorias. El codificador convolutivo está propuesto en este estándar para corregir errores de bits independientes. (José Andrés Marzo Icaza, 2011).

**Randomizer:** Este proceso garantiza la protección a los datos introduciendo incertidumbre teórica en la información, con el objetivo de evitar grandes cadenas de repetición de unos o ceros. Este procedimiento de aleatorización de bits se realiza en los canales de subida y bajada. (Licea, 2009).

**Codificador FEC:** En este proceso WiMAX maneja varios tipos FEC según la medición de SNR del canal de manera automática adaptativa, y se define como el proceso en donde se agrega bits adicionales que establecen redundancia en los bloques de información con el fin de detectar y

corregir los posibles errores durante su transmisión y recepción en el canal inalámbrico; dentro del modelo se establecen la aplicación de códigos convolucionales Reed-Solomon, obligatorios para los canales subida y bajada, definido por el estándar IEEE 802.16. Adicionalmente, de manera optativa se pueden aplicar códigos turbo convolucionales y códigos de turbo bloques (Licea, 2009).

Los FEC usados se especifican de acuerdo con el tipo de modulación, el estándar presenta siete combinaciones de modulación (ver la tabla 1) con sus respectivas tasas de codificación, tasa de codificación del codificador convolutivo con sus siglas CC (code rate) y tasa de codificación total (código convolutivo más Reed-Solomon "Overall coding rate"), las cuales sirven para garantizar la corrección de errores dependiendo del tipo de modulación usado, esto se conoce como modulación adaptativa. (Ver la figura 5).

La tasa de codificación hace referencia a la relación de los datos sin codificar comparados con los datos codificados, la columna "RS code" reseña el código Reed Solomon usado (N, K, T), en donde: N es el número total de bytes después de la codificación, K es el número total de bytes antes

**Tabla 1.** Codificación por modulación.

Modulation	Uncoded block size (bytes)	Code block size (bytes)	Overall coding rate	RS code	CC code rate
BPSK	12	24	1/2	(12,12,0)	1/2
QPSK	24	48	1/2	(32,24,4)	2/3
QPSK	36	48	3/4	(40,36,2)	5/6
16-QAM	48	96	1/2	(64,48,8)	2/3
16-QAM	72	96	3/4	(80,72,4)	5/6
64-QAM	96	144	2/3	(108,96,6)	3/4
64-QAM	108	144	3/4	(120,108,6)	5/6

**Fuente:** Tomado de (Committee, 2004).

de la codificación,  $T$  es el número total de bytes que pueden ser corregidos. (Committee, 2004).

**Interleaver:** Este proceso permite proteger la información contra secuencias largas y consecutivas de errores (errores de ráfaga), posibilitando solo la presencia de errores aleatorios haciendo una distribución de los bits errados por medio de un proceso de entrelazado en grupos diferentes de corrección, ya que los errores de ráfaga afectan gran número de bits consecutivos, y es una de las causas más frecuentes que ocasionan gran pérdida de información. (Licea, 2009).

**Modulación:** Una vez que la información es codificada, debe ser modulada utilizando una de las siguientes constelaciones: BPSK, QPSK, 16QAM o 64QAM; para poder transmitirla. Estas constelaciones pueden modular 1, 2, 4 y 6 bits por símbolo, respectivamente.

Una constelación constituye una secuencia de bits como una secuencia de símbolos representados por valores complejos (Licea, 2009).

Las modulaciones establecidas para enlaces de bajada y subida son BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM; sus constelaciones se muestran en la figura 6 (José Andrés Marzo Icaza, 2011).

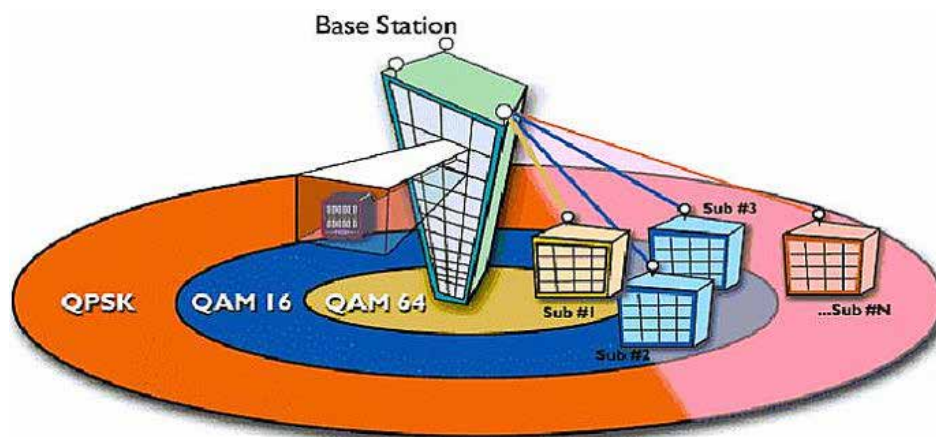
**OFDM:** La multiplexación por división de frecuencias ortogonales usa la transformada rápida de Fourier o FFT logrando una transmisión por

medio de subportadoras paralelas, eliminando en lo posible la interferencia o traslape entre ellas. El número de subportadoras está dado por el número de muestras que usa la FFT, NFFT. (Zhao, 2011).

Este modelo permite crear redes de radiodifusión de frecuencia única sin que existan problemas de interferencia, ya que las señales se envían al receptor con diferentes retardos y amplitudes. (Izaskun Pellejero, 2006). (Ver la figura 7).

La modulación por división ortogonal de frecuencias (OFDM) es un esquema de modulación/demodulación multiportadora (WESTE, 1998), por lo que su uso se da de manera natural para aplicaciones de banda ancha.

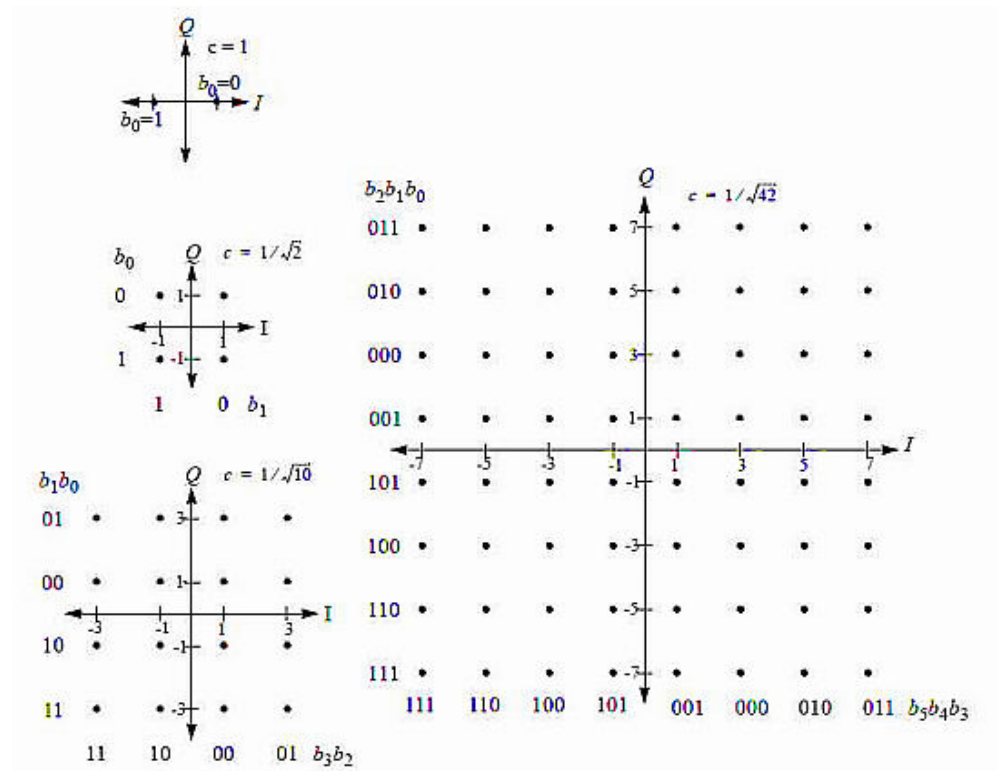
En la figura 8 se puede notar la diferencia existente entre una típica comunicación monoportadora, conocida por sus siglas SC (Single carrier) y una comunicación con múltiple portadora (Multiple carrier) dentro del mismo ancho de banda de transmisión; para el primer caso de SC cada símbolo se transmitiría en forma serial, en un ancho de banda definido en comparación con una comunicación múltiples portadora, en donde los símbolos se envían paralelamente en subportadoras adyacentes, usando algún tipo de multiplexación por división de frecuencias (FDM) y empleando el concepto de ortogonalidad de frecuencias. (Ver la figura 8).



**Figura 5.** Modulación adaptativa de capa física WIMAX 802.216- 2004

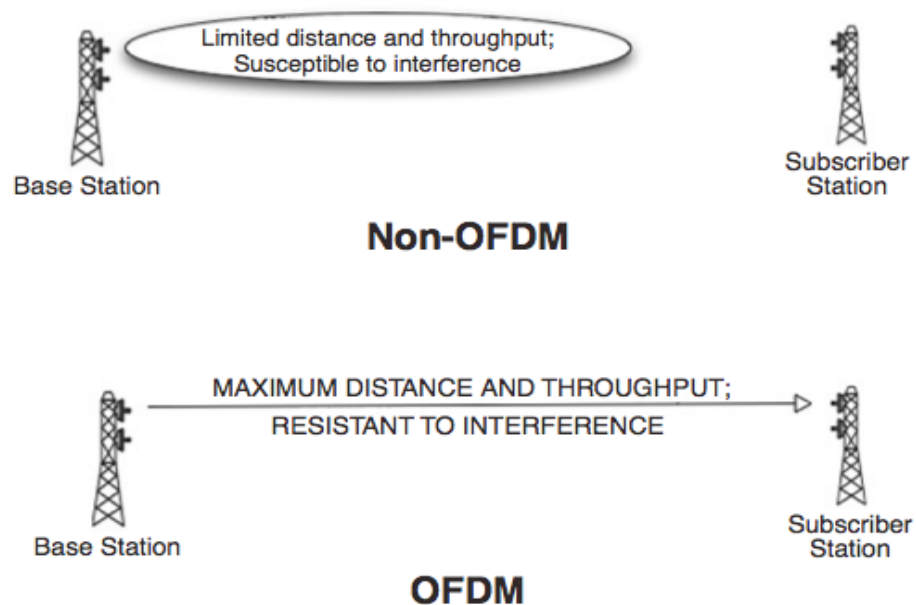
**Fuente:** Tomado de (Pascual, 2007).





**Figura 6.** Constelaciones usadas en el estándar IEEE 802.16-2004.

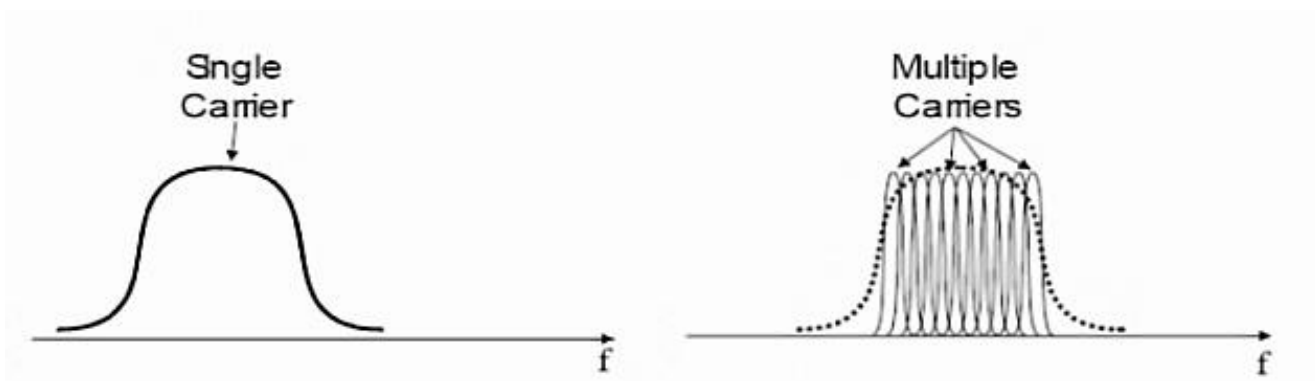
Fuente: Tomado de (José Andrés Marzo Icaza, 2011).



**Figura 7.** Importancia de usar OFDM.

Fuente: Tomado de (OHRTMAN, 2005).





**Figura 8.** Comparación entre transmisión SC y multiportadora (OFDM).

Fuente: Tomado de (Communication, 2003).

Empleando  $N$  sub-portadoras ortogonales en un sistema OFDM cualquiera, separadas en frecuencia por el valor correspondiente a la inversa del tiempo útil del símbolo OFDM, con un período en donde transmiten  $N$  símbolos independientes codificados por QPSK, 16-QAM, 64-QAM o cualquier otro tipo de modulación I/Q (González, 2008), se tiene que la señal modulada se da en términos de la siguiente expresión (1):

$$s(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cos \left[ \left( \omega_c + \frac{2\pi k}{T_u} \right) \cdot t + \theta_k \right] \quad (1)$$

En donde  $A_k$  y  $\theta_k$  son todos los posibles valores, de acuerdo con su constelación usada.

Se puede demostrar ortogonalidad entre sub-portadoras si cada fase y amplitud se mantienen estables durante todo el período del símbolo (González, 2008), demostrando así que para  $m$  y  $n$  se cumple que: (2)

$$\int_{T_u} A_m e^{j \left( \left( \omega_c + \frac{2\pi m}{T_u} \right) t + \theta_m \right)} \cdot A_n e^{-j \left( \left( \omega_c + \frac{2\pi n}{T_u} \right) t + \theta_n \right)} dt = 0 \quad (2)$$

Para el desarrollo del presente artículo se tomó  $n = 256$ .

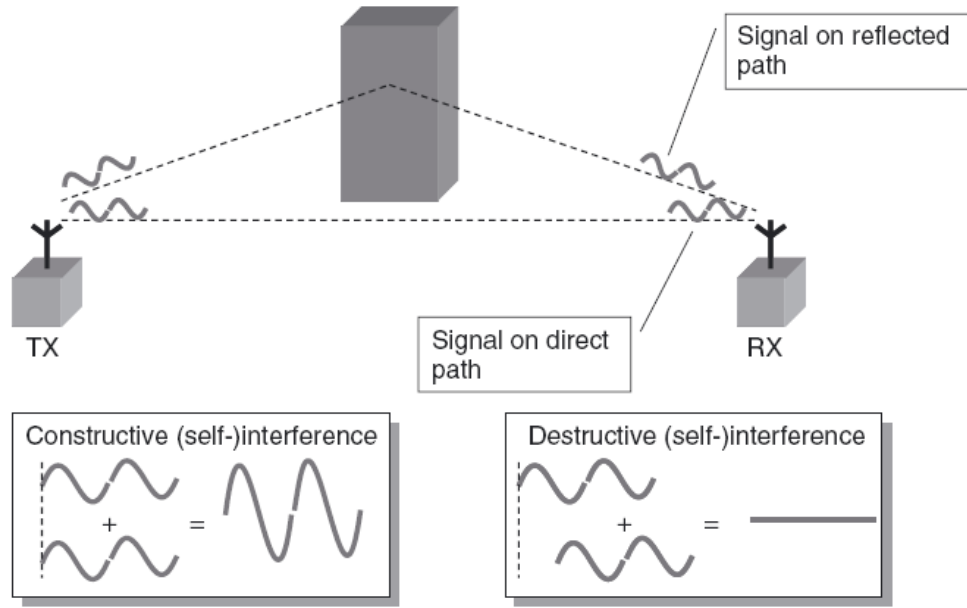
## Fenómenos que interfieren en la transmisión de señal WIMAX

**Fading Rayleigh:** este concepto define el desvanecimiento de la señal debido a múltiples trayectos o múltiples caminos de llegada al receptor que puede tomar las ondas de radio propagadas en el espacio por un emisor (Jamal Mountassir, 2011); estas ondas al ser reflejadas por obstáculos llegan al receptor con un desfase de las señales entre ellas, debido a los caminos recorridos en la propagación, y esto ocasiona una interferencia destructiva y anula la señal, o una constructiva que la incrementaría en caso contrario (Molisch, 2011); ver la figura 9.

**Espectro Doppler de tipo Jakes:** En su libro (William, 1975), Jakes popularizó un modelo de desvanecimiento Rayleigh basado en la suma de sinusoides, en el que los dispersores se distribuyen uniformemente alrededor de un círculo en ángulo  $\alpha_n$  con  $k$  rayos que salen de cada dispersor. El efecto Doppler en rayos  $n$  es (3):

$$f_n = f_d \cos(\alpha_n) \quad (3)$$

El desvanecimiento de Rayleigh de la  $k^{th}$  forma de onda en el tiempo  $t$  y con  $M$  dispersores (William, 1975) puede ser modelado como (4):

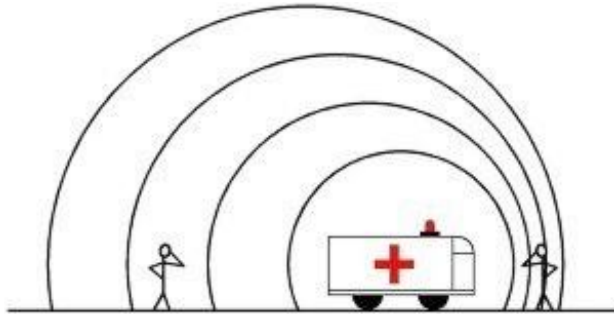


**Figura 9.** Ejemplo de Fading Rayleigh.

Fuente: Tomado de (Molisch, 2011).

$$R(t, k) = 2\sqrt{2} \left[ \sum_{n=1}^M (\cos b_n + j \sin b_n) \cos(2\pi f_n t + q_{n,k}) + \frac{1}{\sqrt{2}} (\cos \alpha + j \sin \alpha) \cos(2\pi f_d t) \right] \quad (4)$$

El modelo Jakes popularizó el espectro Doppler (ver la figura 10) asociado con desvanecimiento por Rayleigh y, como resultado, el espectro Doppler se denomina a menudo espectro Jakes. (Patrick Robertson, 1999).



**Figura 10.** Efecto Doppler.

Fuente: Tomado de (luventicus, 2003).

**AWGN:** El ruido blanco aditivo gaussiano es el patrón o ruido particular empleado para establecer pruebas sobre canales de comunicación inalámbrica, y se determina como la sumatoria de todos los ruidos. Particularmente es análogo en comparación con el caso de color blanco, de donde viene parte de su nombre, que representa la suma de todos los colores. Este modelo de ruido está planteado matemáticamente con una distribución de probabilidad gaussiana. En la aplicación de AWGN durante los procesos de modelamiento de ambientes, se realiza en combinación con la señal de información en el canal, limitando la transmisión de información por la aparición de errores de identificación. (Javvin, 2007).



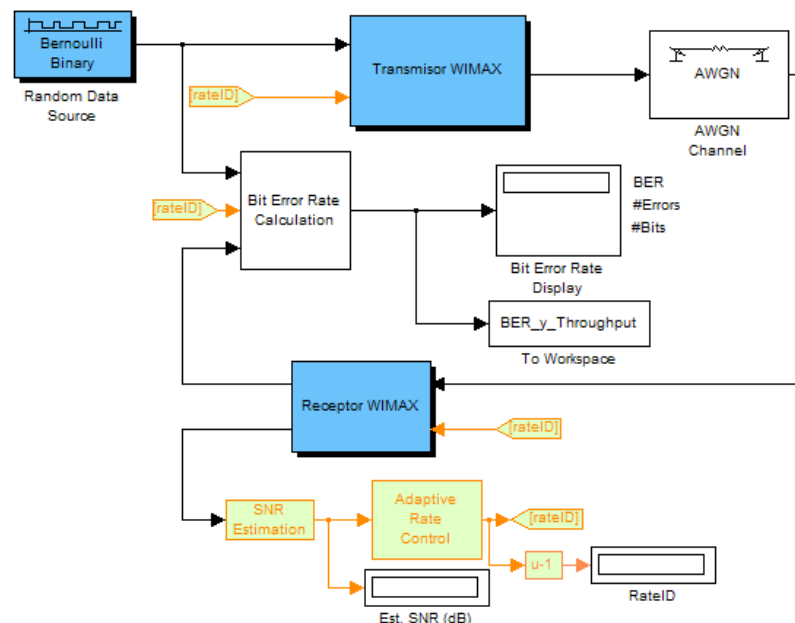
## Escenario con ruido (AWGN)

Para el siguiente escenario (figura 12), se adicionó un bloque de simulación de ruido blanco gaussiano en el canal de comunicación. En este bloque se harán unas variaciones de SNR con el objetivo de ver el comportamiento del modelo ante un canal en presencia de AWGN. Los valores de SNR son aleatorios conforme a una distribución gaussiana, en donde el radio de variación es el valor nominal cargado en el bloque como valor central de variación de SNR en el canal; en otras palabras, los

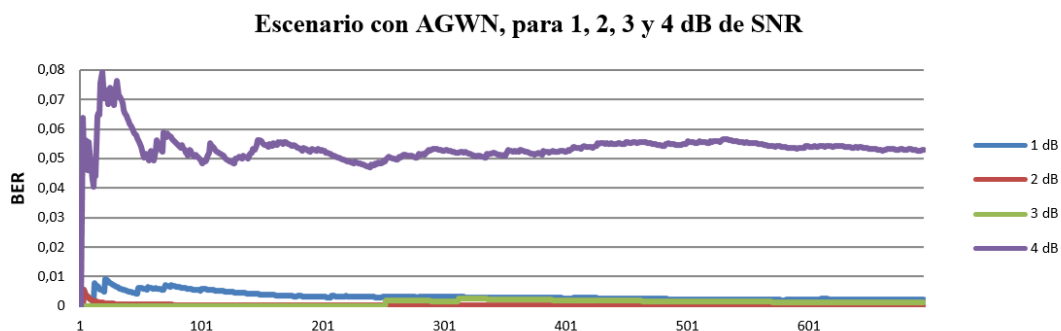
valores tabulados para los ensayos no son valores absolutos y por el contrario, son un radio de aproximación de valores en el tiempo.

En este escenario se emplearon los siguientes radios de SNR: 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 26 y 29 dB.

En las ilustraciones 13, 14 y 15 se muestran los resultados obtenidos a nivel de BER para los diferentes radios de SNR usados cuyo comportamiento fue notable; para los valores centrales de SNR 8 y 13 dB en adelante, se obtuvieron resultados continuos en 0 dB, de manera que no se tienen en cuenta en las gráficas.



**Figura 12.** Diagrama de bloques canal con ruido WIMAX 802.16-2004.



**Figura 13.** Escenario 2 BER 1 a 4 SNR.

En la figura 13 se puede observar que los valores más altos a nivel del BER se establecen para un valor nominal de radio SNR igual a 4 dB; la razón para la presencia de un alto BER son dos: la primera es que este se encuentra en el sector de más baja relación señal a ruido (canal en las peores condiciones en presencia de ruido), y la segunda y más representativa es que se presentan errores de interpretación al estar conmutando entre los márgenes de cambio de modulación BPSK y QPSK, de acuerdo con los valores de SNR según la distribución aleatoria gaussiana (AWGN) (ver la tabla 3). Esta transición automática entre estos dos tipos de modulación ocasiona grandes contratiempos en la recuperación de la información, debido a ello el proceso de recuperación que se encargará de la integridad de la información queda delegado a las capas superiores (técnicas de retransmisión).

**Tabla 3.** Saltos de modulación, de acuerdo con la relación señal a ruido.

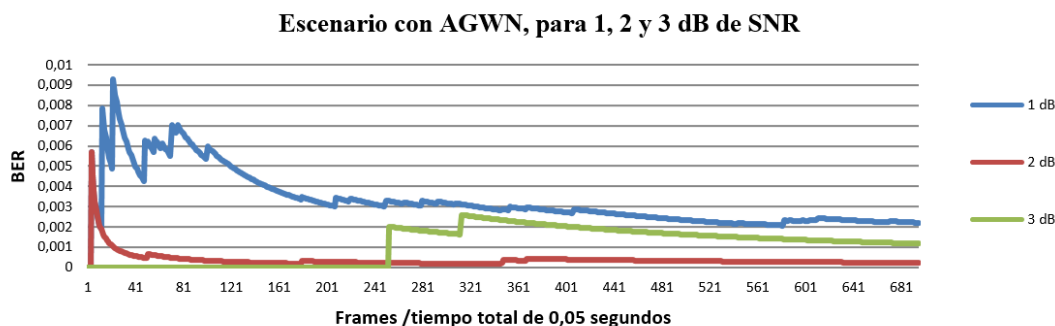
Modulación	Tasa de codificación total	SNR
BPSK	1/2	0 dB < SNR ≤ 4 dB
QPSK	1/2	4 dB < SNR ≤ 10 dB
QPSK	3/4	10 dB < SNR ≤ 12 dB
16-QAM	1/2	12 dB < SNR ≤ 19 dB
16-QAM	3/4	19 dB < SNR ≤ 22 dB
64-QAM	2/3	22 dB < SNR ≤ 28 dB
64-QAM	3/4	29 dB < SNR

La tabla 3 describe los márgenes de cambio, para los tipos de modulación y FEC empleados según la presencia SNR medida en el receptor (es medida únicamente en el receptor, dado que el modelo planteado es un canal de Link Down).

Puede notarse que el sistema no solo cambia de tipo de modulación de manera automática dependiendo del SNR, sino que además se encuentran divisiones que determinan el tipo de FEC empleado en cada modulación (robustez del FEC); esto permite generar más confiabilidad dentro de cada subnivel que representa las peores condiciones de ruido en los segmentos de cada modulación.

En la figura 14 se retira la traza de 4 dB para poder observar el comportamiento en detalle de los valores 1, 2 y 3 dB de SNR; se puede notar que aunque siguen estando en las peores condiciones de señal a ruido, se comportan mejor que 4 dB; esto se debe a que la variación de radios de SNR no se encuentra en el margen de salto de modulación.

En la figura 15 se puede ver que los valores graficados se encuentran en condiciones relación a ruido medias, y con relación a los valores de la gráfica anterior se ve que el valor del BER disminuye a más de la mitad; esto indica que con una relación señal a ruido mayor que 4 dB la cantidad de bits errados en la transmisión disminuye con respecto a los valores pico de 4 dB a 6 dB de SNR en una proporción de 88%.



**Figura 14.** Escenario 2 BER 1 a 3 SNR.

Para resumir, se cuenta con las simulaciones del primer grupo (1, 2, 3 y 4 dB), que representan las peores condiciones y que contienen los índices más altos de bits errados (mayores BER) en comparación con los demás valores de SNR, la proporción de valor promedio de BER para 4 dB con respecto al primer grupo nombrado es 49 veces mayor y con respecto al primer valor de SNR del siguiente grupo (6, 8, 10, 11, 12, 13, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 26, y 29 dB) es 346,9 veces mayor, aclarando que a medida que aumenta el valor de SNR los valores de BER disminuyen notablemente hasta llegar a cero.

Con base en esto se puede afirmar que el canal tiene mejores condiciones de transmisión y que se envía mayor cantidad de información, ya que emplean tipos de modulación que permiten mayor número de símbolos en la transmisión, de acuerdo con los valores de SNR dados.

Para los valores de radio de SNR iguales a 8 dB y superiores e iguales a 13 dB, el BER se comporta con un valor constante igual a cero, lo que garantiza que la información recibida en el escenario de un canal en presencia de AWGN no trae errores, o si los presenta, los códigos FEC son suficientemente robustos para corregirlos en la capa física de este modelo.

En las figuras 16 a 18 se puede observar claramente el comportamiento del throughput, únicamente para los valores de radio de SNR que

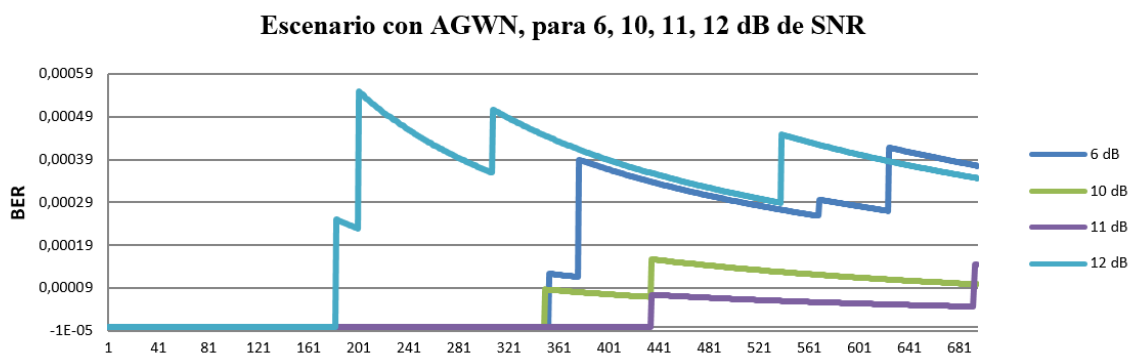
se encuentren en el margen de salto de modulación (ver la tabla 3) se verán cambios bruscos.

En las figuras 16 y 17 se puede observar un nivel de Throughput estable en 88 bits por frame para los valores de radio de SNR iguales a 1 y 2 dB, en 3 dB se ven dos pequeños saltos de 88 a 184 bits por frame, y en 4 dB se ve secuencias de cambios bruscos entre 88 y 184 bits por frame a nivel de Throughput; esto se relaciona con el número de bits que recibe cada bloque de modulación, dado que se presenta un salto entre tipos de modulación por el valor de SNR variante en el tiempo. Los bits por frame en BPSK serán de 88 y para QPSK  $\frac{1}{2}$  serán de 184; esto se puede ver en la tabla 2.

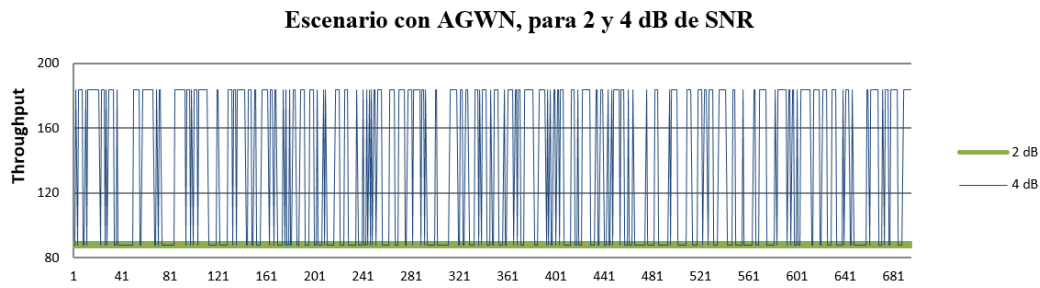
La información totalizada de los valores de BER para un período de 0,05 segundos con 695 frame se encuentra en la tabla 4.

**Tabla 4.** Valores BER Escenario 2.

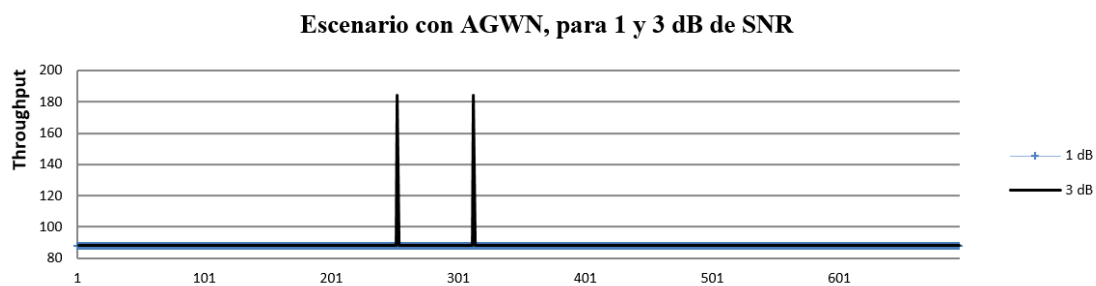
Valor central de SNR	Valor promedio por frame	Valor central de SNR	Valor promedio por frame
1	0,003312068	13	0
2	0,000359569	16	0
3	0,001093574	19	0
4	0,053587685	20	0
6	0,000154475	21	0
8	0	22	0
10	5,5818E-05	23	0
11	2,22485E-05	26	0
12	0,000288637	29	0



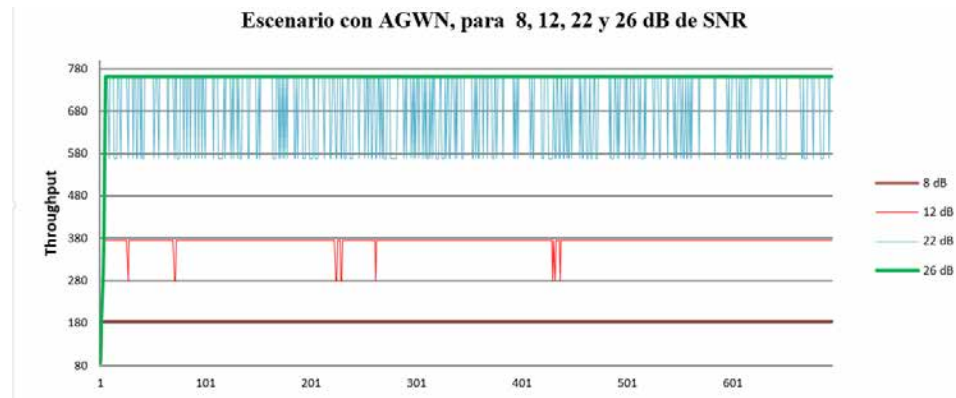
**Figura 15.** Escenario 2 BER 6, 10, 11, 12 SNR.



**Figura 16.** Escenario 2 Throughput 2 y 4 SNR.



**Figura 17.** Escenario 2 Throughput 1 y 3 SNR.



**Figura 18.** Escenario 2 Throughput 8, 12, 22, 26 SNR.

En las figuras 18 y 19 se puede ver con claridad nuevamente los valores de radios SNR de frontera para los diferentes tipos de modulación (ver la tabla 3); adicionalmente aquellos valores que no se encuentran o no varían sobre los valores de cambio de modulación permanecen con un Throughput de gran estabilidad o constante, según el tipo de modulación y bloque FEC empleado con relación a la señal a ruido del canal (ver la tabla 2).

En resumen, se tiene que 6 dB y 8 dB permanecen estables en 184 bits por frame con relación al tipo de modulación QPSK  $\frac{1}{2}$ , 16 dB permanece estable en 376 bits por frame de acuerdo con el tipo de modulación 16 QAM  $\frac{1}{2}$ , 20 dB permanece estable en 558 bits por frame que hace referencia al tipo de modulación 16 QAM  $\frac{3}{4}$ , 23 dB y 26 dB permanecen estables en 760 bits por frame que es modulación 64 QAM  $\frac{2}{3}$ .



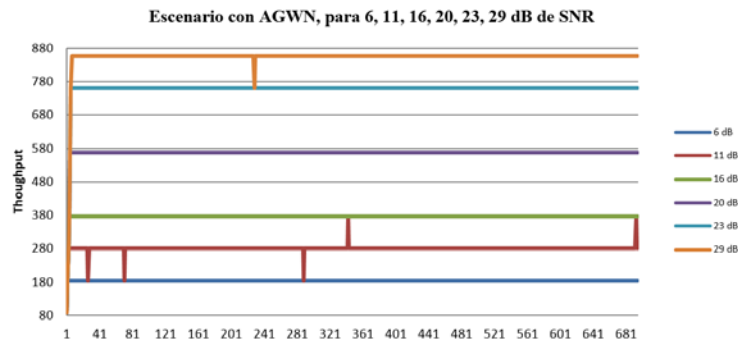


Figura 19. Escenario 2 Throughput 6, 11, 16, 20, 23, 29 SNR.

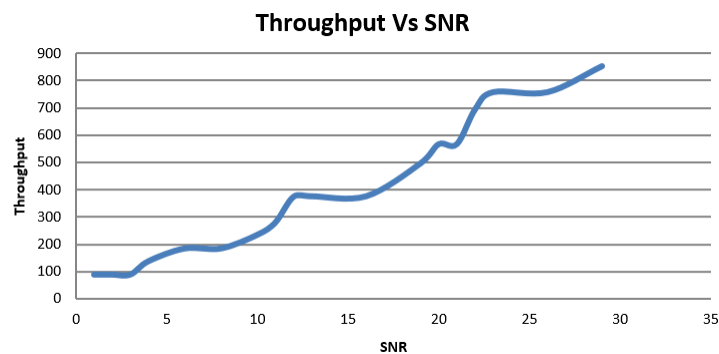


Figura 20. Escenario 2 Throughput en función de SNR.

Además 11 dB oscila entre 184 bits por frame con relación al tipo de modulación QPSK  $\frac{1}{2}$  y 280 bits por frame que es modulación QPSK  $\frac{3}{4}$ , 12 dB oscila entre 376 bits por frame en modulación 16 QAM  $\frac{1}{2}$ , y 280 bits por frame por modulación QPSK  $\frac{3}{4}$ , 22 dB fluctúa entre 568 bits por frame con relación al tipo de modulación 16 QAM  $\frac{3}{4}$  y 760 bits por frame en modulación 64 QAM  $\frac{2}{3}$ , 29 dB cambia entre 760 bits por frame por modulación 64 QAM  $\frac{2}{3}$  y 856 bits por frame con relación al tipo de modulación 64-QAM  $\frac{3}{4}$ .

Existen dos valores de SNR que tienden a estabilizarse en un punto, estos son: primero 26 dB que se estabiliza en 64 QAM  $\frac{2}{3}$  (figura 18) y segundo, 29 dB que se estabiliza en 64-QAM  $\frac{3}{4}$  (figura 19).

Finalmente, se muestra la tabla 5 con los datos recolectados; estos valores se usaron para construir la respectiva curva de Throughput por frame en función de SNR de la figura 20.

Tabla 5. Tabla de valores throughput, Escenario 2.

Valor de SNR (dB)	Acumulado en 0,03 segundos 5 (bits)	Valor promedio por frame (bits)	Throughput (bits) / segundo
1	61160	88	1223200
2	61160	88	1223200
3	61352	88,27666	1227040
4	95336	137,1741	1906720
6	127784	183,8619	2555680
8	127784	183,8619	2555680
10	162632	234,0029	3252640
11	194216	279,4475	3884320
12	259592	373,5137	5191840
13	260744	375,17122	5214880
16	260744	375,17122	5214880
19	344648	495,8964	6892960
20	393416	566,06619	7868320
21	393416	566,06619	7868320
22	481736	693,14532	9634720
23	525896	756,68489	10517920
26	525896	756,68489	10517920
29	591944	851,71799	11838880

## Escenario con Rayleigh Fading

Este escenario contempla la simulación del sistema de capa física del estándar 802.16-2004 frente a unas condiciones de transmisión que contemplan un canal en presencia de ruido y el fenómeno de desvanecimiento por múltiples trayectorias de tipo Rayleigh (Rayleigh Fading), como se muestra en la figura 21.

En la configuración de la simulación de desvanecimiento por multitrayectoria se define en el canal una segunda trayectoria, con un valor en potencia de -3 dB y un retardo de 2  $\mu$  segundos.

Adicionalmente, se realizará la simulación con distintos valores de máxima frecuencia de variación de Doppler para el canal, empleando los valores 1, 10, 80, 800 y 8000 Hz.

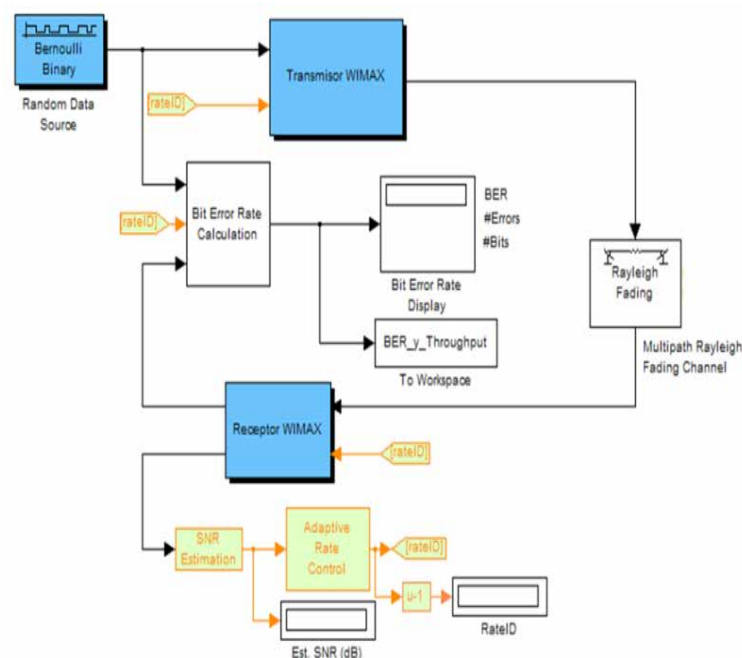
La variación de frecuencia Doppler permitirá evaluar este estándar para condiciones de movilidad.

En la figura 22 se agrupa todas las variaciones de Doppler y en la figura 23 se presenta excluyendo el valor 8000 Hz para visualizar con mayor detalle los valores obtenidos.

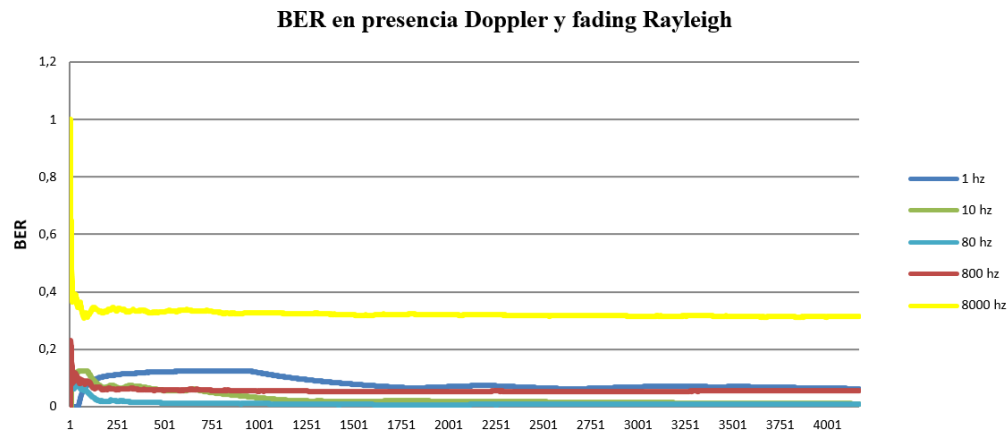
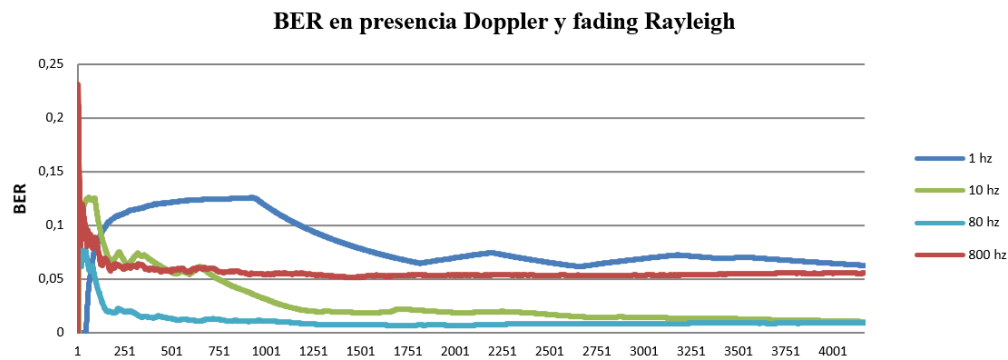
En la figura 22 se observa un valor muy alto en los primeros instantes de tiempo de la transmisión, para todos los valores de frecuencia máxima de Doppler y posteriormente una estabilización de la variación de los valores de BER cercanos a un valor constante.

Los altos valores dentro de los primeros frames de transmisión indican el proceso de adaptación del sistema a las condiciones cambiantes de los tipos de modulación, que dependen directamente del valor de SNR que se mide en el receptor. Los valores se estabilizan pero tienen una tendencia de acuerdo con el valor de Doppler máximo que puede alcanzar, lo que denota que los valores máximos de BER se presentan con los valores máximos de frecuencia simulada (8000 Hz) con un valor promedio de 0,3225 que claramente indica los problemas clásicos de móviles en alta velocidad frente a las estaciones base.

En la figura 23 se observa que igualmente los valores de BER se estabilizan, aunque a frecuencias muy bajas esta estabilización se hace más lenta. A continuación damos los valores en la tabla 6.



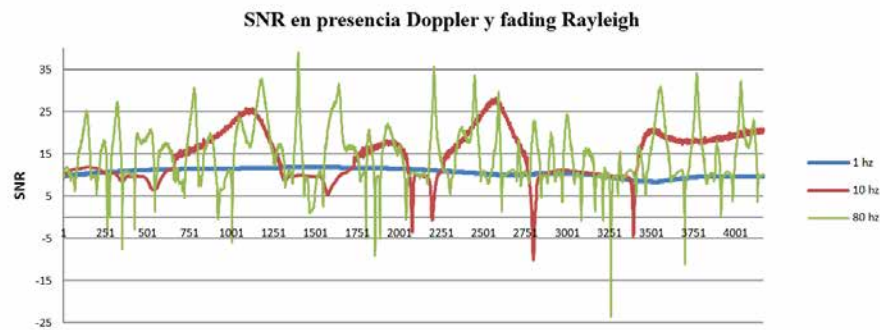
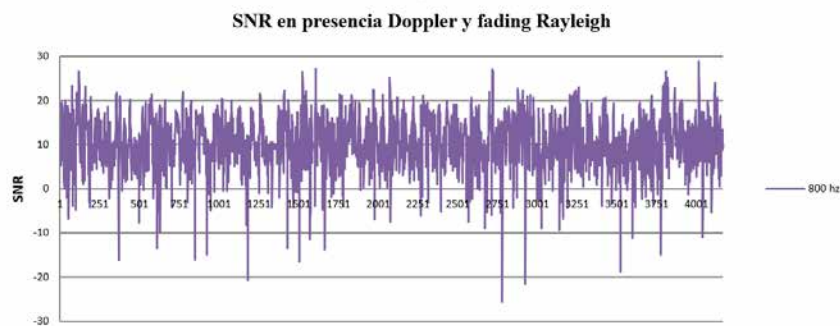
**Figura 21.** Diagrama de bloques, canal sin ruido fading y Rayleigh WIMAX 802.16-2004.

**Figura 22.** Escenario 3 BER con variaciones de Doppler.**Figura 23.** Escenario 3 BER con variaciones de Doppler.**Tabla 6.** Resumen de valores de BER, escenario 3.

Frecuencia max. Doppler (Hz)	Valor promedio	Valor máximo (pico)	Valor mínimo	Valor promedio después del frame 1000
1	0,081499084	0,125787159	0	0,072628664
10	0,02768387	0,12585324	0	0,01649817
80	0,01114218	0,12320917	0	0,00830547
800	0,05626038	0,23096026	0	0,05400856
8000	0,32253095	1	0,30823529	0,31804238

Para la medición de SNR en el canal, visto desde el receptor en el escenario establecido en este punto, se puede observar que las condiciones de señal a ruido del canal presentan un incremento en su variación a medida que se aumenta el valor máximo de frecuencia Doppler en el canal; para el

caso de un Doppler máximo de 1 Hz (ver la figura 24), el comportamiento es de una curva que oscila de manera suave con variaciones en el margen superior y el inferior; pero para una frecuencia máxima de 8000 Hz (ver la figura 25) la variación de valores de SNR es más grande y abrupta.

**Figura 24.** Escenario 3 SNR con variaciones de Doppler.**Figura 25.** Escenario 3 SNR con variaciones de Doppler.

La tabla 7 muestra una relación de los valores obtenidos, en donde se observa claramente la variación de márgenes entre el valor mínimo y el máximo, el cual se incrementa a medida que el valor máximo de Doppler aumenta.

**Tabla 7.** Resumen de valores de SNR, escenario 3.

Frecuencia max. Doppler (Hz)	Valor promedio	Valor máximo	Valor mínimo
1	10,65356928	11,8294115	8,404946673
10	14,5593132	28,246153	-10,0951097
80	14,5389346	39,0395099	-23,6257297
800	11,0030268	28,8609585	-25,6779712

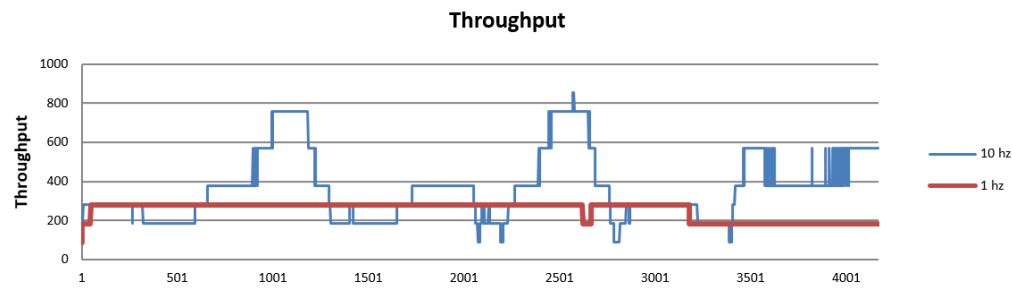
En cuanto al throughput, se puede encontrar que este depende directamente del valor de SNR detectado en el receptor; a medida que se inicia el barrido con un valor máximo de frecuencia

Doppler se presentan variaciones de SNR, el sistema responde cambiando el tipo de modulación y codificación FEC para mantener la integridad de la información transmitida.

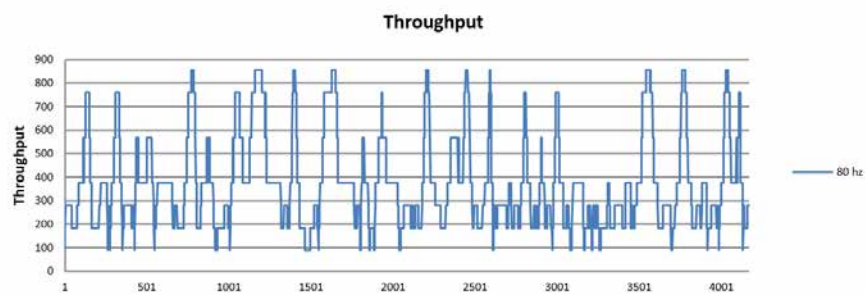
En la figura 26 se puede ver el comportamiento del Throughput con frecuencias máximas de Doppler de 1 y 10 Hz; como se puede observar, la variación de tipos de modulación que se presentan para el caso de 1 Hz es menor que para el caso de 10 Hz; esto se debe a que para este último el SNR presenta una variación más alta ya que se mueve por todos los tipos de modulación.

En la figura 27 se puede observar igualmente una variación sobre todos los tipos de modulación pero con una frecuencia de barrido más alta, dado el aumento de la frecuencia máxima de Doppler; caso similar ocurre en la gráfica de 800 Hz (figura 28).

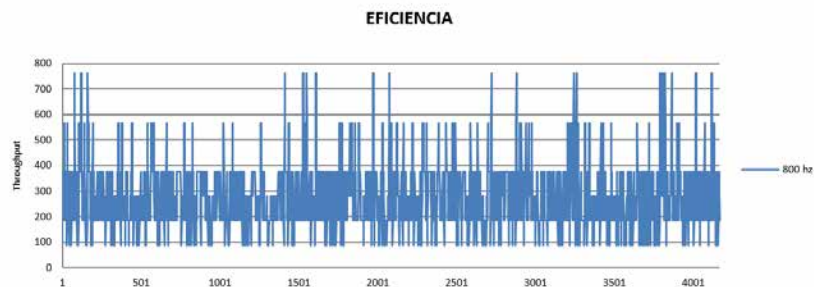
En la tabla 8 se presentan los valores medios de Throughput para los períodos de simulación de 0,3 segundos de transmisión o 4167 frames.



**Figura 26.** Escenario 3 throughput 1 y 10 Hz.



**Figura 27.** Escenario 3, throughput 80 Hz.



**Figura 28.** Escenario 3, throughput 800 Hz.

Como se puede notar en los valores de la tabla 8, existe una frecuencia máxima de Doppler con un valor entre 10 y 80 Hz que permite la máxima transferencia de información, pero a medida que la máxima frecuencia de Doppler aumenta, las condiciones de variación de SNR disminuyen notablemente las condiciones de Throughput para el canal; esto tiene resultado en dos factores, el promedio de variaciones de SNR que representan cambios de modulación y el incremento del BER.

**Tabla 8.** Resumen de valores throughput, escenario 3.

Frecuencia máxima de Doppler (Hz)	Acumulado en 0,3 segundos (bits)	Valor promedio por frame	Throughput / segundo
1	1062888	255,07271	3542960
10	1529448	367,038157	5098160
80	1558056	373,90353	5193520
800	1174440	281,843053	3914800
8000	387624	93,0223182	1292080

## CONCLUSIONES

### Escenario sin ruido

Este modelo sin perturbaciones en su canal simplemente tiene cero en su BER y su Throughput alcanza el máximo valor de 856 bits por frame con modulación 64-QAM  $3/4$ .

### Escenario con AWGN

El modelo de capa física de WiMAX estándar 802.16-2004 es un sistema que se adapta útilmente a las condiciones de ruido blanco gaussiano y su eficiencia de transmisión aumenta en disminución de la presencia de AWGN. Pero presenta importantes márgenes de error en el límite de cambio de tipo de modulación BPSK y QPSK con un valor nominal de 4 dB de SNR; es decir, cuando el canal presenta su BER más alto y es sometido a niveles de SNR que fluctúan alrededor de 4 dB, estos valores de BER obtenidos durante la simulación son una gran desventaja en un canal operativo y dependerán de su corrección en capas superiores, disminuyendo notablemente el Throughput real de operación al solicitar retransmisiones de información. Estas pérdidas de información podrían disminuirse al sacrificar la eficiencia de transmisión y bajar el umbral de transición, aunque para un mejor análisis es necesario ver el Throughput del sistema adicionando ráfagas de retransmisión.

En canales en presencia de AWGN con niveles de relación SNR superiores a 13 dB el comportamiento del canal muestra su mayor eficiencia de transmisión y niveles cero de BER, pero claramente la aparición de múltiples trayectorias incrementa el valor y variación de SNR en el sistema.

### Escenario con Rayleigh Fading

En este escenario es claramente notorio que a medida que aumenta la frecuencia máxima de Doppler, se hace más impredecible los valores de

SNR presentes en el receptor generados por las múltiples trayectorias. Los valores máximos de BER aumentan con respecto a mayor frecuencia en el escenario de simulación.

Adicional a lo anterior, y para concluir, la aparición de múltiples trayectorias y movimiento de uno de los puntos de comunicación (aparición de efecto Doppler) involucra la aparición de un valor de SNR que es tomado por el sistema de capa física para evaluar el tipo de modulación y FEC a emplear, para garantizar la comunicación entre los puntos. Sin embargo, los valores de BER en la comunicación establecen claramente que este fenómeno no puede modelarse únicamente como un valor de ruido blanco gaussiano, si se busca un alto rendimiento y llevar la pérdida de información a cero empleando únicamente capa física, aunque los métodos empleados de corrección de errores hacia adelante combinados con la selección automática de tipo de modulación demuestra una gran versatilidad a la hora de sopesar canales afectados por ruido y desvanecimiento por múltiples trayectorias.

## FINANCIAMIENTO

Ninguno

## REFERENCIAS

- Al-Adwany, M. A. (2010). A Performance Study of Wireless Broadband Access (WiMAX). *IEEE*, pp. 320-324.
- Cadavieco, D. L. (6 de mayo de 2012). WiMAX. Aproximación técnica al estándar IEEE 802.16 y breve descripción de su infraestructura como tecnología de última milla. Recuperado el 4 de octubre de 2012, de: <http://www.dea.icae.upco.es/sadot/Comunicaciones/avanzadas/WiMAX.pdf>
- Committee, L. S. (2004). IEEE Std 802.16-2004 IEEE STANDARD FOR LOCAL AND METROPOLITAN AREA NETWORKS. *IEEE*, p. 434.
- Communication, R. (10 de enero de 2003). Second Generation High-Capacity Broadband Wireless Solutions. Recuperado el 1 de octubre de



- 2012, de: [http://bos.fkip.uns.ac.id/pub/onno/library-ref-eng/ref-eng-3/physical/wireless/wimax/Redline\\_OFDM\\_Whitepaper\\_1.0.pdf](http://bos.fkip.uns.ac.id/pub/onno/library-ref-eng/ref-eng-3/physical/wireless/wimax/Redline_OFDM_Whitepaper_1.0.pdf)
- Erceg, V. (27 de junio de 2003). Channel models for fixed wireless applications. Recuperado el 1 de octubre de 2012, de IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group: [http://www.ieee802.org/16/tga/docs/80216a-03\\_01.pdf](http://www.ieee802.org/16/tga/docs/80216a-03_01.pdf)
- González, J. M. (2 de noviembre de 2008). Simulación de un Esquema de Modulación/Demodulación OFDM Utilizando un Modelo de Canal Multitrayectoria. Recuperado el 1 de octubre de 2012, de Escuela Superior Politécnica Del Litoral, Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación: [http://www.cib.espol.edu.ec/DIGIPATH/D\\_Tesis\\_PDF/D-38117.pdf](http://www.cib.espol.edu.ec/DIGIPATH/D_Tesis_PDF/D-38117.pdf)
- Izaskun Pellejero, F. A. (2006). *Fundamentos y aplicaciones de seguridad en redes wlan*. Barcelona, España: Marcombo.
- Jamal Mountassir, H. B. (2011). Simulating the WiMAX Physical Layer in Rayleigh Fading Channel. *IEEE* (pp. 281-284). Timisoara, Romania: U. P. Department of Communications.
- Javvin, T. (2007). *Network Dictionary*. California, USA: Dong and Jielin.
- José Andrés Marzo Icaza, R. L. (2011). *Simulación e implementación en FPGA de un esquema de codificación del canal sujeto al estandar de Wimax*, vol. 3. *Avances en ciencias de Ingeniería*.
- Licea, V. R. (1 de octubre de 2009). *Modelado de Redes WiMAX*. Recuperado el 1 de octubre de 2012, de: [http://profesores.fi-b.unam.mx/victor/CCNA/Productos/Notas%20de%20Curso/Manual%20de%20la%20Asignatura%20de%20Redes%20Inalambricas%20de%20Banda%20Ancha%20\(Avance%2050%25\).pdf](http://profesores.fi-b.unam.mx/victor/CCNA/Productos/Notas%20de%20Curso/Manual%20de%20la%20Asignatura%20de%20Redes%20Inalambricas%20de%20Banda%20Ancha%20(Avance%2050%25).pdf)
- luventicus (20 de marzo de 2003). *El Efecto Doppler en la Física Clásica y en la Física Relativista*. Recuperado el 1 de octubre de 2012, de: <http://www.luventicus.org/articulos/03U006/index.html>
- Molisch, A. F. (2011). *Wireless Communications*. California, USA: Wiley IEEE.
- Nuaymi, L. (2007). *WiMAX: Technology for Broadband Wireless Access*. San Francisco, USA: Wiley.
- Ohrman, F. (2005). *WiMAX Handbook. Building 802.16 Wireless Networks*. San Francisco, USA: McGraw-Hill.
- Pascual, A. E. (1 de octubre de 2007). *WiMAX y Soluciones no Estándar*. Recuperado el 1 de octubre de 2012, de: [http://www.itrainonline.org/itrainonline/mmtk/wireless\\_es/files/14\\_es\\_WiMAX-y-soluciones-no-Estandar\\_presentacion\\_v02.pdf](http://www.itrainonline.org/itrainonline/mmtk/wireless_es/files/14_es_WiMAX-y-soluciones-no-Estandar_presentacion_v02.pdf)
- Patrick Robertson, S. K. (1999). *The Effects of Doppler Spreads in OFDM(A) Mobile Radio Systems*. Institute for Communications Technology German Aerospace Center (DLR). 1, pp. 329-333. IEEE.
- Pérez, V. T. (1 de septiembre de 2009). Análisis Y Diseño De Mecanismos De Handoff En Redes Inalámbricas De Banda Ancha IEEE 802.16e. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma De México. Recuperado el 6 de octubre de 2012, de: [http://profesores.fi-b.unam.mx/victor/CCNA/Productos/Tesis/Tesis%20Terminadas/Tesis\\_Maestria\\_Victor\\_Toledo\\_Sep\\_2009.pdf](http://profesores.fi-b.unam.mx/victor/CCNA/Productos/Tesis/Tesis%20Terminadas/Tesis_Maestria_Victor_Toledo_Sep_2009.pdf)
- Weste, N. (1 de octubre de 1998). VLSI for OFDM. *IEEE*, pp. 127-131.
- William, J. (1975). *Microwave Mobile Communications*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Zhao, X. (2011). A new frame synchronization algorithm for OFDM WiMAX system in Simulink. 4, pp. 2321-2325. IEEE.





