



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACION:
SIMULACIÓN DE UNA RED WiMAX MEDIANTE MATLAB/SIIMULINK

Previa la obtención del Grado Académico de Magíster en
Telecomunicaciones

ELABORADO POR:
Ing. Andrea Monserrate Coello Barén.

Guayaquil, Junio del año 2015



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por la Magíster **Andrea Monserrate Coello Barén** como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de Magíster en Telecomunicaciones.

Guayaquil, Junio del año 2015

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACION

MsC. Edwin Palacios Meléndez

REVISORES:

MsC. María Luzmila Ruilova Aguirre.

MsC. Luis Córdova Rivadeneira

DIRECTOR DEL PROGRAMA

MsC. Manuel Romero Paz



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

YO, ANDREA MONSERRATE COELLO BAREN

DECLARÓ QUE:

El trabajo de titulación “SIMULACIÓN DE UNA RED WiMAX MEDIANTE MATLAB/SIIMULINK”, previa a la obtención del grado Académico de Magíster, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del trabajo de titulación del Grado Académico en mención.

Guayaquil, Junio del año 2015

EL AUTOR

Ing. Andrea Monserrate Coello Barén



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

AUTORIZACIÓN

YO, ANDREA MONSERRATE COELLO BAREN

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del trabajo de titulación de Maestría titulado: “SIMULACIÓN DE UNA RED WiMAX MEDIANTE MATLAB/SIIMULINK”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, Junio del año 2015

EL AUTOR

Ing. Andrea Monserrate Coello Barén

Dedicatoria

Dedico esta tesis especialmente a mi madre Teodora Barén Cedeño mujer de lucha que siempre infundo en mí sus conocimientos y esas ganas de salir adelante, a la que le debo mi vida y mi superación, gracias a su confianza depositada y su ayuda incondicional a lo largo de mis estudios; y aunque está en el Cielo sé que estaría orgullosa de mi.

A mis hermana Lidia, Josefita, Jesenia, Eugenia, Anabel Coello Barén por su apoyo absoluto y confianza les quedo infinitamente agradecida, a mi Padre Francisco y a toda mi familia por estar siempre cuando los necesito.

Agradecimientos

Primeramente a Dios por haberme guiado por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y enseñándome a encarar las adversidades y no desfallecer en el intento, por permitirme llegar a cumplir cada una de mis metas propuestas.

A los docentes a quien les debo gran parte de mis conocimientos gracias a su paciencia y enseñanza, a esta prestigiosa Universidad que nos preparó para un futuro competitivo y formándonos como personas de bien.

A mis compañeras amigas Ing. Andrea Alcívar, Ericka Almeida que estuvieron presentes en todo el transcurso de esta preparación por siempre haberme dado fuerzas para seguir adelante. A toda las personas que estuvieron a lo largo de esta nueva meta.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
Resumen	XI
Abstract.....	XII
Capítulo 1: Descripción preliminar del proyecto de grado.....	13
1.1. Introducción.....	13
1.2. Antecedentes.....	14
1.3. Definición del problema	14
1.4. Objetivos.....	14
1.5. Hipótesis.....	15
1.6. Metodología de investigación.....	15
Capítulo 2: Fundamentos Teóricos.....	16
2.1. Introducción de WiMAX.....	16
2.2. Funcionamiento básico de la Red WiMAX.....	18
2.3. Arquitectura de las Redes WiMAX.....	19
2.4. Características de las Redes WiMAX.....	22
2.5. Componentes de una Red WiMAX.....	23
2.6. Estándares WiMAX.....	26
2.7. Especificaciones de la capa física del estándar IEEE 802.16.	27
2.8. Capa física técnica de duplexación.....	29
2.8.1. División de frecuencia dúplex (FDD).....	30
2.8.2. División de tiempo dúplex (TDD).....	31
2.9. Modulación por Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal y Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM-OFDMA).....	31
2.10. Calidad de Servicio (QoS) de las Redes WiMAX.....	32
2.11. Seguridad de Redes WiMAX.....	34

Capítulo 3: Simulación y Evaluación.....	36
3.1. Parámetros de Simulación.....	36
3.1.1. Parámetros de modulación digital OFDM.....	36
3.1.2. Parámetros de transmisión.....	38
3.1.3. Parámetros de canal.	39
3.2. Diferencias entre los parámetros WiMAX y Wi-Fi.....	40
3.3. Simulación de la Red WiMAX en Simulink.	41
3.4. Resultados obtenido durante la simulación de WiMAX.	45
3.4.1. Simulación con única antena en transmisiones.....	45
3.4.2. AMC y sus efectos en los resultados.....	50
3.4.3. Simulación con múltiples antenas en transmisiones.	51
Conclusiones	54
Recomendaciones	55
Referencias Bibliográficas	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2:

Figura 2. 1: Esquemático del funcionamiento básico de una Red WiMAX.	19
Figura 2. 2: Conexión WiMAX punto a punto.	20
Figura 2. 3: Conexión WiMAX punto a multipunto.	21
Figura 2. 4: Sistema de Red Mesh.	22
Figura 2. 5: Esquema de comunicación WiMAX.	25
Figura 2. 6: Estructura de la capa PHY IEEE 802.16.	29
Figura 2. 7: Tráfico ascendente y descendente entre WiMAX SS y BS.	30
Figura 2. 8: FDD en modo full dúplex.	30
Figura 2. 9: FDD en modo full dúplex.	31
Figura 2. 10: Distribución de usuarios mediante modulaciones OFDM y OFDMA. ...	32

Capítulo 3:

Figura 3. 1: Diagrama de bloques en Simulink para la simulación de una Red WiMAX.	42
Figura 3. 2: Comparativa entre esquemas de modulación en el BER no codificado.	47
Figura 3. 3: Comparativa entre diferentes esquemas de modulación y tasas de codificación en la BER codificada.	48
Figura 3. 4: Comparativa entre diferentes tipos de desvanecimiento.	49
Figura 3. 5: Curvas BER vs. SNR en un canal variante en el tiempo para el escenario F.	50
Figura 3. 6: Comparativa entre los resultados obtenidos con y sin utilizar el esquema AMC.	50
Figura 3. 7: Comparativa entre diferentes grados de diversidad.	52
Figura 3. 8: Rendimiento del sistema usando esquemas de diversidad.	53

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 2:

Tabla 2. 1: Estándares IEEE para Redes WiMAX.	23
--	----

Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Valores de parámetros primarios.	39
Tabla 3. 2: Diferencias entre parámetros de simulación de WiMAX y Wi-Fi.	40
Tabla 3. 3: Esquemas de modulación y tasa de codificación.....	46

Resumen

El trabajo de graduación de la Maestría en Telecomunicaciones consistió en simular una red WiMAX a través de escenarios en la que estaban presenten una antena o múltiples antenas, así como la variación de los parámetros de las subportadoras con las que funciona la tecnología WiMAX. El programa que permitió realizar la simulación de una red WiMAX fue la plataforma MatLab/Simulink, la misma que dispone de librerías para los sistemas de telecomunicaciones para diseñar con facilidad nuevos bloques que permitan cumplir con los propósitos del trabajo de grado.

Abstract

The graduation work of the Masters in Telecommunications was to simulate a WiMAX network through scenarios in which they were presented an antenna or multiple antennas, and the variation of the parameters of the subcarriers works with WiMAX. The program allowed the simulation of a WiMAX network was the platform MatLab / Simulink, the same as has libraries for telecommunication systems to easily design new blocks that would meet the purpose of the thesis.

Capítulo 1: Descripción preliminar del proyecto de grado.

1.1. Introducción.

El crecimiento experimentado en el uso de las redes digitales ha llevado a la necesidad de que el diseño de las nuevas redes de comunicación sea de mayor capacidad. La industria de las telecomunicaciones también está cambiando, con una demanda de una mayor gama de servicios, como videoconferencias o aplicaciones con contenidos multimedia.

La mayor dependencia de las redes de computadoras y el Internet ha dado lugar a una mayor demanda de conectividad que se proporciona "cualquier lugar, cualquier momento", lo que lleva a un aumento de los requisitos para una mayor capacidad y en especial los sistemas de telecomunicación inalámbricas de alta fiabilidad de banda ancha.

La disponibilidad de banda ancha trae conectividad de alto rendimiento a más de un mil millones de usuarios en todo el mundo, desarrollando así nuevos estándares inalámbricos de banda ancha y tecnologías que abarcan rápidamente la cobertura inalámbrica. Las comunicaciones digitales inalámbricas son un campo emergente que ha experimentado una espectacular expansión durante los últimos años.

Por otra parte, la enorme tasa de absorción de tecnología de telefonía móvil, WLAN (Wireless Local Area Network) y el crecimiento exponencial de Internet han dado lugar a un aumento de la demanda de nuevos métodos de obtención de las redes inalámbricas de alta capacidad. WiMAX es un estándar de red inalámbrica que tiene como objetivo abordar la interoperabilidad entre productos basados en estándares IEEE1 802.16.

WiMAX define un WMAN2, una especie de un gran punto caliente que proporciona conectividad inalámbrica de banda ancha interoperable para, y los usuarios nómadas portátiles fijos.

1.2. Antecedentes.

Wi-Fi o WLAN es el nombre con el que los productos a base de estándares IEEE 802.11 son conocidos. Incluye la especificación 802.11a, capaz de ofrecer velocidades de datos de 54 Mbps que trabajan en la banda de frecuencia de 5,2 GHz; y la especificación 802.11b, en la banda de frecuencia de 2,4 GHz, que proporciona a los usuarios con velocidades de datos de 11 Mbps. Esta tecnología tiene generalmente un área de cobertura de 100 metros y anchos de banda de canal fijo de 20 MHz.

WiMAX parecía satisfacer la necesidad de ofrecer acceso inalámbrico a MAN. Fue diseñado para ofrecer servicios BWA a las áreas metropolitanas que proporcionan a los usuarios con rangos de cobertura más grandes y mayores velocidades de datos. Sistemas WiMAX son capaces de apoyar a los usuarios en rangos de hasta 50 km, con una visibilidad directa con la estación base y varía de 1 a 7 kilómetros, donde no hay visibilidad está disponible.

1.3. Definición del problema

Necesidad de realizar el diseño de un modelo de Red WiMAX mediante escenarios a través de la plataforma de simulación MatLab.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General:

Desarrollar modelos de simulación para una Red WiMAX a través de la plataforma MatLab.

1.4.2. Objetivos específicos:

- ✓ Describir los fundamentos teóricos de sistemas de comunicación redes inalámbricas WiMAX.
- ✓ Diseñar y evaluar diferentes escenarios de simulaciones para redes WiMAX y que permita desarrollar la evaluación de la modulación digital
- ✓ Evaluar el diagrama de bloques de la red WiMAX.

1.5. Hipótesis

El modelado de una red WiMAX a través de MatLab/Simulink permitirá comprobar la funcionalidad de esta red con diferentes escenarios y esquemas de modulación digital como OFDM.

1.6. Metodología de investigación.

El diseño del modelo simulación propuesto es de carácter empírico analítico mediante el método explicativo cuyo enfoque es cuantitativo, ya que se manejan las variables dependientes, es decir, los parámetros de simulación para los diferentes escenarios propuestos.

Capítulo 2: Fundamentos Teóricos.

2.1. Introducción de WiMAX.

La tecnología Wimax fue creada en el año 2001 por Wimax Forum, organización dirigida por la industria sin fines de lucro que certifica y promueve la compatibilidad e interoperabilidad de productos inalámbricos de banda ancha según la norma IEEE 802.16. El objetivo principal del WiMAX Forum es acelerar la adopción, implementación y expansión de las tecnologías WiMAX en todo el mundo al tiempo que facilita el servicio de roaming, compartiendo las mejores prácticas.

El WiMAX Forum trabaja en estrecha colaboración con los proveedores de servicios y reguladores para garantizar que los sistemas WiMAX Forum Certified cumplan los requisitos del cliente y del gobierno, así lo da a conocer (Wimax Forum, 2015) en su página web. En un conversatorio dirigido a Declan Byrne, presidente del WiMAX Forum sobre el tema “WiMAX Advanced” podría permitir la conexión a dispositivos LTE, escrito por Rafael A. Junquera 3 Mayo, 2013 expresa que la esencia de esta tecnología es ofrecer servicios de banda ancha inalámbrica en bandas licenciadas, el cual tiene una buena acogida por operadores en los últimos años ya que en la actualidad hay más de 30 millones de usuarios WiMAX en el mundo y se estima un crecimiento en los próximos años de entre 6 y 8 millones de nuevos usuarios en el sector de proveedores de servicios, aun así la tecnología que predomina en la oferta de banda ancha móvil será LTE, pero que se están realizando investigaciones por parte de la comunidad Wimax Forum para crear una capa que permita integrar las dos tecnologías de forma económica.

Esto es por parte de los operadores móviles de banda ancha de tecnología LTE y en lo que se está trabajando para que estos dispositivos se

puedan integrar y admitir en la nueva tecnología Wimax Advanced, pero también indica que en los últimos años se ha visto como WiMAX ha crecido en otros mercados industriales, como aviación, gas y petróleo. Estas industrias no están necesariamente interesadas en las tecnologías desarrolladas por el 3GPP y que tienen sus raíces en una tecnología de circuitos y voz.

Estos usuarios quieren IP y Ethernet, y WiMAX cumple estos requisitos. Así que se está viendo la adopción de WiMAX para estos sectores. Especialmente interesante es cómo el sector de la aviación en Estados Unidos y Europa estará utilizando WiMAX en los aeropuertos. Y se habla de grandes aeropuertos. (Byrne, 2013).

(Mario Casado García, 2008) Las Wimax acrónimo en inglés de *WorldWide Interoperability for microwave access* en español interoperabilidad mundial para acceso por microondas, es un estándar de comunicación vía radio eléctrico promovido por el Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica IEEE 802.16, permite conectarse a los usuarios de computadoras con coberturas de hasta 50 km a una red de área local conectándose a través de torres WiMax de transmisión y recepción de señal entre empresas que estén ubicadas en zonas lejanas donde extender cable de fibra óptica puede resultar muy oneroso.

La organización sin fines de lucro Wimax Forum, a partir del estándar IEEE 802.16 comienza a definir un conjunto de perfiles con el objetivo de obtener compatibilidad e interoperabilidad de los productos con este estándar, este precisa algunas características obligatorias en las capas física y de enlace, obteniendo los nuevos estándares el IEEE 802.16d-2004, llamado perfil de sistema fijo que utiliza tecnología OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales), definido en bandas de 2-11 GHz, en la capa física y otro basado en el estándar IEEE 802.16e-2005 llamado perfil

de sistema móvil que utiliza acceso OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales) escalable a S-OFDMA, definido en bandas de entre 2-6 GHz.

(Rendón Gallón, Ludeña González, & Martínez Fernández , 2011) En el libro de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones para zonas rurales, expresa que la versión en vigor del estándar es la 802.16-2009, que revisa y unifica las versiones anteriores del mismo: 802.16-2001, 802.16c-2002, 802.16a-2003, 802.16-2004 y 802.16e-2005, 802.16f, y 802.16g, añadiendo algunas funcionalidades. Este estándar fue diseñado para redes inalámbricas de área metropolitana (WMAN) y, como la gran mayoría de los estándares IEEE, define la capa física (PHY) y sobre todo se centra en especificar la capa de control de acceso al medio (MAC).

Como tecnología de acceso inalámbrico de banda ancha, existe otra alternativa para los usuarios, acceder a servicios de banda ancha, específicamente Internet de alta velocidad (HSI). WiMAX tiene la capacidad de ofrecer servicios de triple play, es decir, voz, video y datos a través de microondas de RF (Radio Frecuencia) espectro para usuarios fijos o móviles que hacen de banda ancha disponible en cualquier lugar.

Eso es lo que lleva WiMAX siendo considerado como una tecnología de banda ancha personal. Por encima de todo, el hecho de que WiMAX es un estándar internacional es la principal ventaja de la tecnología WiMAX a través de sistemas anteriores como LMDS (Sistema de Distribución Local Multipunto) y MMDS (Servicio de Distribución Multipunto por Microondas) que experimentaron adopción y despliegue limitado.

2.2. Funcionamiento básico de la Red WiMAX.

Las WiMax en términos prácticos funcionan igual que las redes WiFi pero con la diferencia que lo hacen a velocidades más altas, a mayores

distancias y soportan más número de usuarios, y pueden cubrir áreas rurales que en la actualidad no poseen acceso a redes de banda ancha.

En el fichero de proyectos de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla confirma que el funcionamiento de la red Wimax es el siguiente:

Que la estación Wimax se conecta a una red de comunicaciones pública, usando fibra óptica, enlaces de microonda, o cualquier tipo de conexión de alta velocidad punto a punto a lo que se le llama Backhaul o redes de retorno. Solo en pocos casos, como el de las redes malladas, se usan conexiones punto o multipunto como Backhaul.

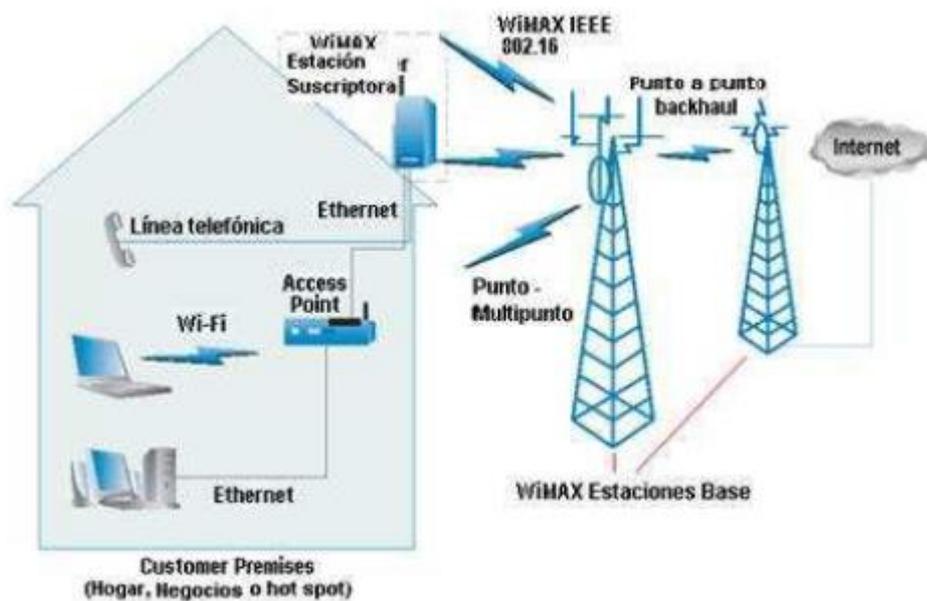


Figura 2. 1: Esquemático del funcionamiento básico de una Red WiMAX.

Fuente: (Byrne, 2013)

2.3. Arquitectura de las Redes WiMAX.

La construcción de las redes Wimax son de tres tipos; punto a punto, punto a multipunto y malla o también llamado Mesh. (Espías Fernández,

2007) En su tesis doctoral describe que las conexiones punto a punto llamadas también Backhaul o simplemente red de retorno, permiten enlaces de alta capacidad a precios competitivos que el radio enlace en la actualidad, un ejemplo de esta arquitectura se la indica en figura 2.2.

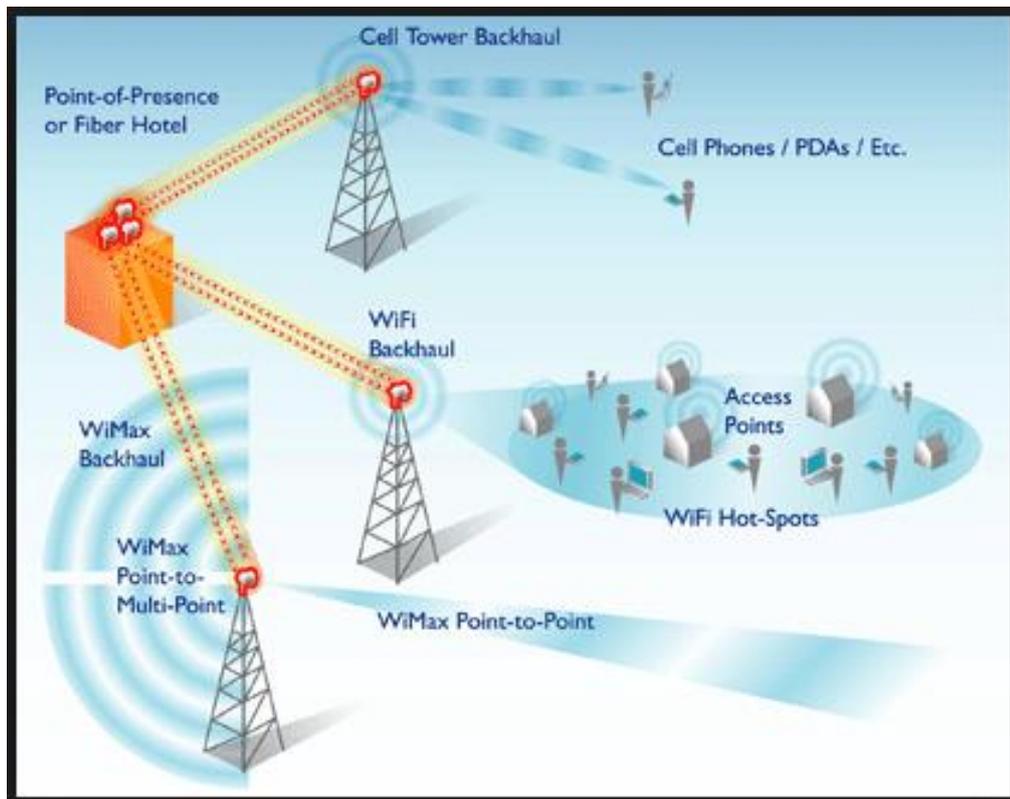


Figura 2. 2: Conexión WiMAX punto a punto.
Fuente: (Byrne, 2013)

(Rendón Gallón, Ludeña González, & Martínez Fernández , 2011) Las conexiones punto a multipunto que es en la mayoría de casos donde interactúan estaciones suscriptoras tanto móviles como fijas, estas redes son mas versátiles por que proporcionan un gran número de servicios adicionales a los usuarios de las areas de cobertura ya que incorporar interfaces 10/100/1000 base-T Ethernet, E1 y puertos específicos para voz y adicionalmente tambien puede emplearse como un Backhaul de otras redes y así puede atender a varios nodos combinadamente, tal como se muestra en la figura 2.3.

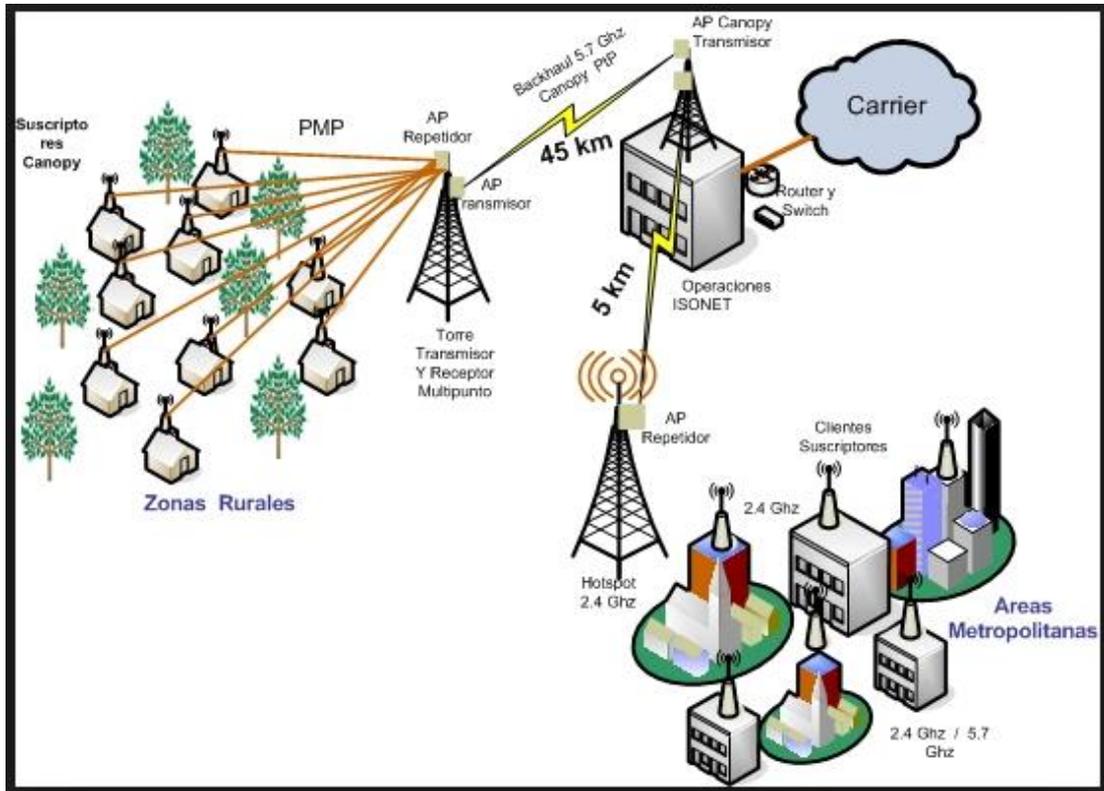


Figura 2. 3: Conexión WiMAX punto a multipunto.
Fuente: (Ocampo, Martínez, Moreno, & González, 2015)

La arquitectura de malla o *mesh* es una red en la cual cada terminal de usuario es capaz de formar varios enlaces con usuarios contiguos, de tal forma que existen algunas alternativas para llegar al punto de inicio de la red.

Estas redes configuran algunos enrutamientos encaminando la comunicación de forma más adecuada para que llegue a su destino final, de tal forma que si este tramo de red deja de funcionar, buscará otros caminos alternos para depositar la información a su destino, los sistemas de red mesh son denominados nodos y son típicamente omnidireccionales o para antenas

dirigidas a 360°, en la figura 2.4 se muestra la arquitectura de una red Mesh para WiMAX.

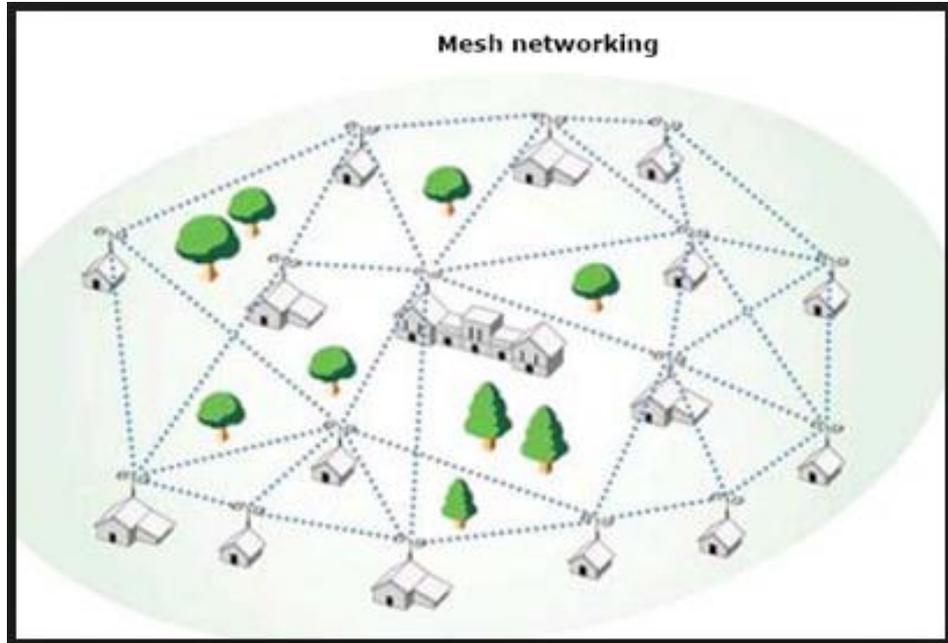


Figura 2. 4: Sistema de Red Mesh.
Fuente: (Byrne, 2013)

2.4. Características de las Redes WiMAX.

Las redes WiMAX cuentan con características específicas que las hacen diferentes de las demás redes como son:

- Mayor productividad con rangos más distantes (hasta 50 Km.).
- Mejor tasa de bits/segundo/HZ en distancias largas.
- Similitud con los sistemas de cable o ADSL
- Acceso a la red con velocidades hasta 150 km/h, aun si esta en movimiento.
- Soporte de servicios a diferentes niveles en empresas o usuarios.
- Disponibilidad de 70 Mbps de banda ancha por usuario y de 420 Mbps por estación base.
- Sincronización de datos, video y voz.
- Ofrece Calidad de Servicio (QoS) en 802.16e simultáneamente.

- Posibilidad de que los usuarios se puedan comunicar sin necesidad de haber visión entre ellos aplicando las redes malladas (*mesh networks*).
- Maneja OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) y OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)
- Facilidad de instalación 2 horas máximo.
- Contiene además soporte con tecnología Smart antenas, que en gran medida aumentan y mejoran la cobertura.

Tabla 2. 1: Estándares IEEE para Redes WiMAX.

	802.16	802.16 a	802.16 e
Espectro	10 – 66 GHz	<11GHz	<6GHz
Funcionamiento	Solo con visión directa	Sin visión directa	Sin visión directa
Tasa de bit	32 - 134 Mbit/s con canales de 28 MHz	Hasta 75 Mbit/s con canales de 20 MHz	Hasta 15 Mbit/s con canales de 5 MHz
Modulación	QPSK, 16QAM y 64 QAM	OFDM con 256 subportadoras QPSK, 16QAM, 64QAM	Igual que 802.16a
Movilidad	Sistema fijo	Sistema fijo	Movilidad pedestre
Anchos de banda	20, 25 y 28 MHz	Seleccionables entre 1,25 y 20 MHz	Igual que 802.16a con los canales de subida para ahorrar potencia
Radio de celda típico	2 - 5 km aprox.	5 - 10 km aprox. (alcance máximo de unos 50 km)	2 - 5 km aprox.

Fuente: Caixanova por Carlos Prado Cumbrado

2.5. Componentes de una Red WiMAX.

Las Wimax en si funcionan con dos tipos de componentes o elementos: Incorpora el equipo de usuario o CPE (Customer Premises Equipment). Este equipo permite que las redes puedan conectarse

rápidamente con la estación base (BS) por el medio radial. También provee de funciones como las SS (Subscriber Station) que a su vez están establecidas para la maniobra de las redes Broadband Wireless Access (BWA).

Estación Base (BS): La BS es responsable de proveer la interfaz inalámbrica al MS. Otras funciones que pueden ser parte de la BS son las llamadas de “gestión para la micro movilidad”, tal como: handoff triggering y tunnel establishment, radio resource management, QoS policy enforcement, traffic classification, DHCP (Dynamic Host Control Protocol) proxy, key management, session management, y multicast group management.
(Pijo Pérez, 2013)

La estación base que proporciona las funciones de BS (Base Station), también brinda conectividad a los mecanismos de control con las funciones de SS, y también gestiona los equipos de las mismas. Se conoce además que la estación base contiene o incluye los elementos esenciales que le permitirán conectarse con el sistema de distribución.

A continuación se denotará un esquema en el cual se podrá observar los dos elementos antes mencionados que componen las redes WiMAX, además se especificará las probables configuraciones de conectividad que fluctúan entre ellas. Se puede decir que en forma global las redes WiMAX contienen una arquitectura comparable a las redes de los celulares tradicionales, debido a que se fundamenta a una proporcionalidad trascendental o estratégica de un sin número de instalaciones en las cuales se situarán las estaciones base (BS).

Toda estación base maneja configuraciones Punto-Multipunto (PMP) las cuales radican en la unión o conjunto de antenas estratégicamente ubicadas en el centro de un soporte y también maneja el Punto-Punto (PTP) para las respectivas conexiones de los clientes.

En las configuraciones punto-multipunto (PMP) un enlace WiMAX se realiza a partir de una estación base (BS) Dentro de un sector y para una determinada frecuencia (canal) todas las estaciones (BS) reciben la misma potencia o partes de la misma. (Ocampo, Martínez, Moreno, & González, 2015)

Además puede que impere la viabilidad de que las estaciones de los clientes se conecten entre ellas.

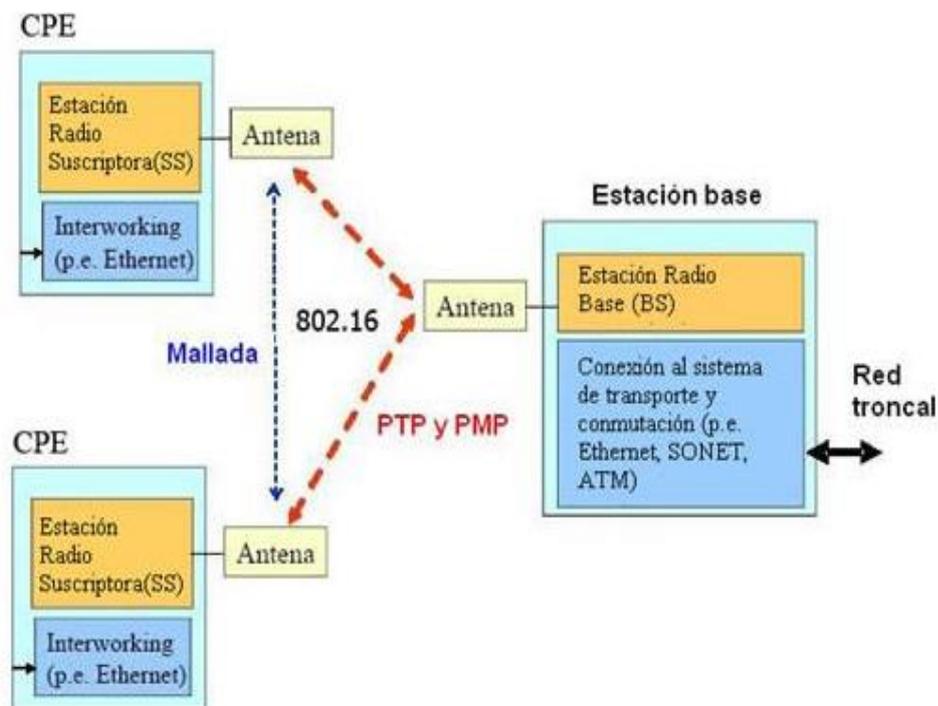


Figura 2. 5: Esquema de comunicación WiMAX.
Fuente: (Ocampo, Martínez, Moreno, & González, 2015)

2.6. Estándares WiMAX.

(Pijo Pérez, 2013) El estándar IEEE 802.16 es de acceso a redes inalámbricas de áreas metropolitanas reuniendo interfaces de radio. Debido a la interfaz que adopta se la distingue como una tecnología de banda ancha con acceso inalámbrico y con siglas BWA (Broadband Wireless Access). El IEEE 802.16 o Wimax a lo largo de los años ha obtenido diversas revisiones, que a continuación se presentaran las más influyentes:

- **802.16a:**

Esta fue divulgada en el año 2003 para el mes de enero la cual para que facilite la conectividad de la última milla. Tolera vínculos con línea de vista y de la misma forma sin ellos (LOS y NLOS)

- **802.16d:**

Divulgada en el año 2004 para el mes de octubre, también se la conoce como WiMAX para redes fijas y estables con calidad de seguridad y servicio; este estándar constituye una conexión radial entre la estación base y el equipo que maneja el usuario en cual se encuentra ubicado en la residencia del mismo. Las velocidades que se manejan para el medio fijo son de 70 Mbps y que además disponen de 20 MHz en ancho de banda.

No obstante en el medio real las velocidades que se han obtenido han sido de hasta 20 Mbps de hasta 6 kilómetros con radios de célula y que este a su vez es distribuido por todos los usuarios de una celda. Además da accesos en celdas con radios que varían entre 3km y 10km.

- **802.16e**

También conocido como WiMAX Móvil, el cual fue divulgado en el año 2006 para el mes Febrero. Esta modificación admite el movimiento del usuario de igual manera a la de un celular o GSM/UMTS ya que permite un completo despliegue. Pero este en la actualidad no se ha desarrollado, en

cambio hoy por hoy enfrenta a la tecnología LTE, y que esta a su vez se conecta mediante cables y está fundada en femtoceldas.

Ya que este estándar es una opción con la que cuentan las operadoras de telecomunicaciones que adoptan los servicios que permiten la movilidad, pero que no está patentado y sin embargo este no es impedimento para que pueda enfrentar al estándar 802.11n, debido a que en su totalidad los dispositivos móviles y portátiles comienzan a estar habilitados con conectividad de este tipo.

- **802.16j**

Divulgado en el año 2009 para el mes de Junio, el cual se concentra en la teoría de los multisaltos, ya que estos brindan coberturas más grandes y admiten capacidades para los sistemas de acceso radial o también conocidos como saltos únicos.

- **802.16-2009**

Divulgado en el año 2009 para el mes de Mayo, este se refiere a una modificación de IEEE802.16-2004. Esto se refiere a la interface aérea la que añade control al medio y una capa de acceso publicada en Mayo del 2009 como enmienda de IEEE802.16-2004. Especifica la interface aérea, incluyendo capa de acceso y control al medio (MAC) y la capa física (PHY), combinando sistemas fijos y móviles de acceso PtMP (Punto-Multipunto) de banda ancha que proveen múltiples servicios.

2.7. Especificaciones de la capa física del estándar IEEE 802.16.

Las especificaciones de la capa física del estándar IEEE802.16 se componen principalmente de capas y subcapas ubicadas en la capa de enlace de datos y en la capa física de toda la estructura, tal como lo refiere (Zapata, 2011) en su tesis de grado “Diseño de una red Inalambrica de datos

para las unidades fijas y móviles de la Policía Nacional en el Distrito Metropolitano de Quito usando la Tecnología Wimax”

Subcapa de convergencia CS, esta es capaz de interactuar con sistemas poderosos como ATM o IP mediante CS SAP (Punto de acceso al servicio, por este motivo la función de la subcapa CS es interactuar entre las funciones de la capa MAC y la de RED.

Núcleo de la capa MAC (MAC CPS), este realiza todas las funciones necesarias para el intercambio de datos y el control de la capa MAC. Está conectado a la capa CS mediante el MAC SAP.

Subcapa Privada, esta subcapa se encarga de los mecanismos de privacidad requeridos por la capa PHY. Por ejemplo el intercambio de clave y los procesos de cifrado y descifrado de la información, se interconecta con la capa PHY mediante PHY SAP

Capa Física, especifica las características de los diferentes modos de operación de la interfaz aérea WiLSS MAN SC (Single Carrier) WirelessMAN SCa, WiLSS MAN OFDM y Wireless MAN OFDMA.

En la figura 2.6 se puede observar la estructura del protocolo 802.16, este se conforma de la capa de aplicación, de presentación, de sesión, de transporte, de red, de enlace y finalmente la física

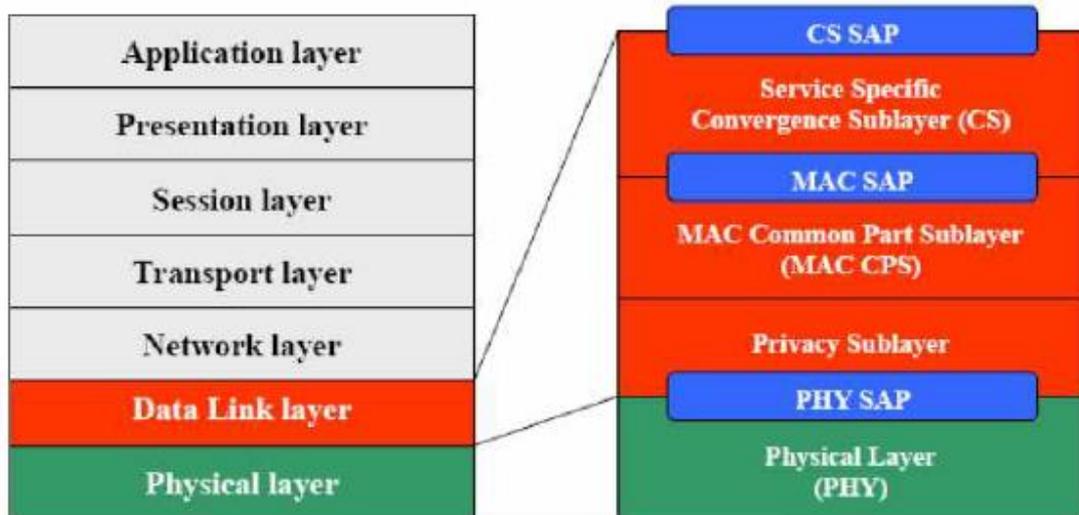


Figura 2. 6: Estructura de la capa PHY IEEE 802.16.
Fuente: (Pijo Pérez, 2013)

2.8. Capa física técnica de duplexación.

La duplexación se refiere a como los enlaces se comunican y es que en este caso lo realizan en dos vías de transmisión inalámbrica, la información de sentido descendente se la realiza desde una estación base a una estación subcritora, mientras que en una transmisión ascendente la información es transmitida de sentido adverso, por tal motivo existen dos esquemas de duplexación, una por División de Tiempo (TDD) y la otra por división de Frecuencia (FDD). En la siguiente figura se muestra dos tipos de enlaces (ascendente y descendente) en una transmisión inalámbrica.

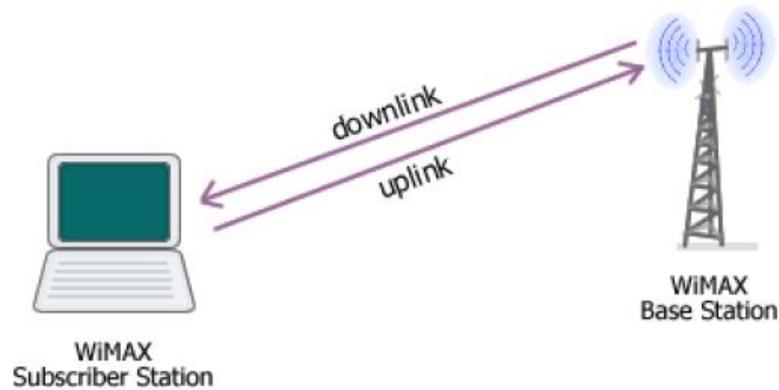


Figura 2. 7: Tráfico ascendente y descendente entre WiMAX SS y BS
Fuente: (Wimax Forum, 2015)

2.8.1. División de frecuencia dúplex (FDD).

Este esquema se constituye por dos canales diferente para la transmisión de una subtrama ascendente y de una trama descendente, los dos canales se transmiten en el mismo slot de tiempo. Adicionalmente es ideal para traficos de voz de dos sentido o llamado bi direccional, tambien es usado en redes celulares de segunda y tercera generación, ademas wimax tambien soporta FDD full Duplex, FDD half Duplex, la diferencia consiste en que una puede transmitir y recibir la información al mismo tiempo, mientras que en la otra se transmite o se recibe información en un momento solicitado.

En la figura 2.8 se observa como por un canal adyacente y en el mismo tiempo se transmiten los datos tanto ascendente y descendente.

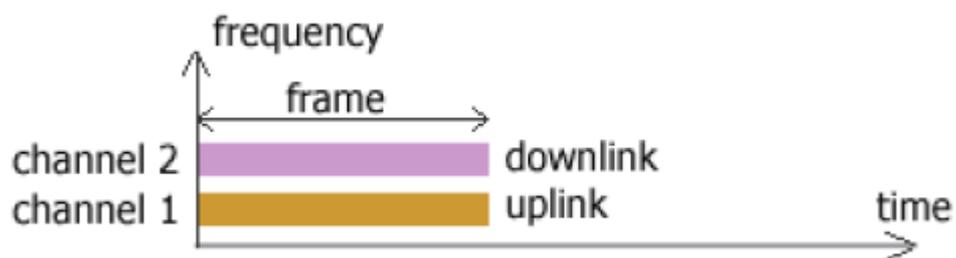


Figura 2. 8: FDD en modo full dúplex.
Fuente: (García, 2014)

2.8.2. División de tiempo dúplex (TDD).

El FDD es ineficaz para implementarlo como para tráfico de datos por lo que este ocupa una pequeña porción de un canal en un tiempo proporcionado, por cuya razón el FDD es un esquema duplex que necesita de un solo canal de transmisión para las subtramas ascendentes y descendentes pero en dos canales de tiempos diferentes, por consiguiente la TDD tiene más eficiencia espectral que FDD.

En la figura 2.9 se puede observar como los datos ascendentes y descendente se transmiten en diferentes slot de tiempos y en un solo canal.

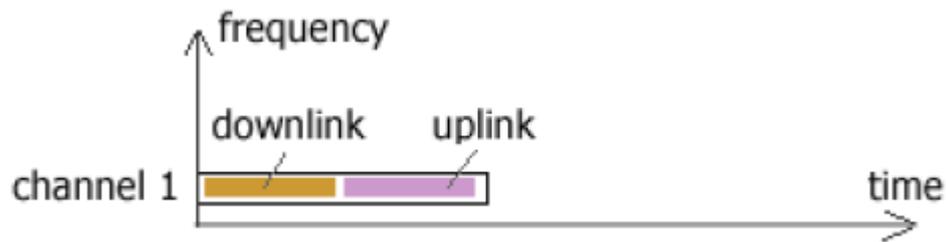


Figura 2. 9: FDD en modo full dúplex.
Fuente: (Byrne, 2013)

Wimax en la mayoría de aplicaciones usa el esquema TDD ya que ahorra su espectro de banda de frecuencia, adicionalmente por que es menos complejo implementarlo y menos costoso. Las primeras versiones de Wimax soportan FDD y TDD en tanto que Wimax móvil solamente incluye TDD (Zapata, 2011).

2.9. Modulación por Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal y Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM-OFDMA).

Son los tipos de modulación empleadas por el estándar 802.16 en frecuencia de operación menores a 11 Ghz, adicionalmente tiene una alta eficiencia espectral debido a su modulación ortogonal y a la codificación empleada. OFDM proporciona todo el espacio de la portadora para que cada

equipo del cliente pueda transmitir a la vez, en cambio OFDMA permite el acceso múltiple para que un equipo del cliente pueda transmitir a través de uno o varios subcanales que le hayan sido asignados.

OFDM soporta la división de espectro de 256 portadoras, mientras que OFDMA permite tener hasta 2048 portadoras con sus respectivos canales de gran ancho de banda. Adicionalmente es una multiplexación que consiste en enviar un conjunto de ondas portadoras de diferentes frecuencias, donde cada una transporta información, la cual es modulada en QAM o en PSK.

La modulación de amplitud en cuadratura (QAM), es una técnica que transporta dos señales independientes, mediante la modulación de una señal portadora, tanto en amplitud como en fase. Mientras que la modulación por desplazamiento de fase (PSK), es una forma de modulación angular que consiste en hacer variar la fase de la portadora entre un número de valores discretos. La señal moduladora es una señal digital y, por tanto, con un número de estados limitado. (Zapata, 2011).

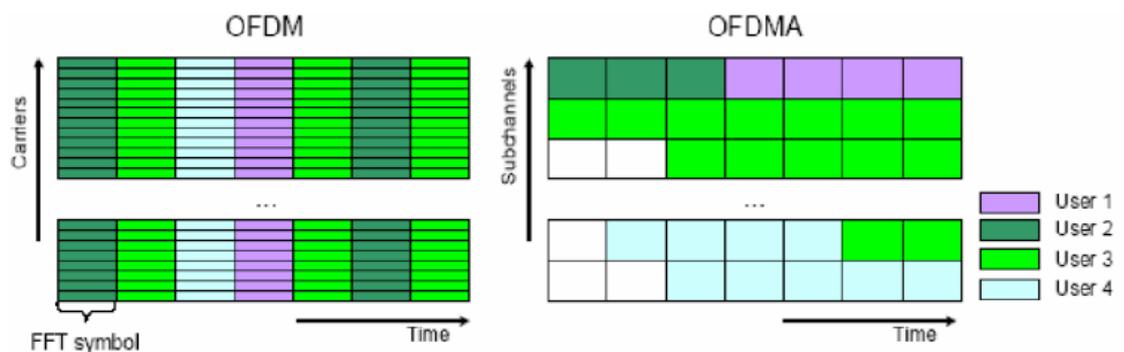


Figura 2. 10: Distribución de usuarios mediante modulaciones OFDM y OFDMA.
Fuente: (Krouk & Semenov, 2011)

2.10. Calidad de Servicio (QoS) de las Redes WiMAX.

(Univerdidad Politécnica Salesiana, 2013) La extensión de voz con la que cuenta la Wimax es de colosal trascendencia y mas aun en mercados en los cuales no estan previstos de este servicio. El estándar 802.16e admite

calidades de servicio en cuanto a voz y video pero requiriendo una baja latencia.

La calidad con la que se prevee y esta conformada la MAC tiene un control en las conexiones para que así la estación base y la suscrita logre un vínculo algorítmico parecido al de las Mash pero con la diferencia de que este es unidireccional entre las dos capas.

De la QoS depende la capa MAC, debido a que esta prevee que cada conexión admita un indentificador de las mismas (CID), y que esta a su vez se convierta en dirrecional momentánea entre las conexiones particulares de datos sobre enlaces. La capa MAC puntualiza tres conexiones administrativas: las conexiones básicas, las primarias y las secundarias.

WiMAX también define un concepto de flujo de servicio que es un flujo unidireccional de paquetes con un conjunto particular de parámetros de QoS e identificado por un el SFID (identificador de flujo de servicio). Los parámetros de QoS podrían incluir prioridad de tráfico, tasa máxima de trafico sostenido, tasa máxima de ráfaga, tasa mínima tolerable, tipo de planificación, tipo de ARQ, retraso máximo, jitter tolerable, tamaño y tipo de unidad de datos, mecanismo a usar para la petición de ancho de banda, reglas para la formación de PDU, etc. El flujo de servicio debe ser provisionado por un sistema de administración de red o creado dinámicamente a través de mecanismos de señalización definidos en el estándar. (Pijo Pérez, 2013)

2.11. Seguridad de Redes WiMAX.

(UNAM, 2012) Como ya es de conocimiento las tecnologías más frecuentes en el mercado como son la WLAN proveen de tanta seguridad, por el contrario WiMAX desde su creación prioriza el tema de la seguridad ya que prevee de un sistema de control para acceder al entorno MAC que otorga un dispositivo de *grand-request* que emite una alerta para autorizar el trafico de datos. Este dispositivo admite lo siguiente:

- Superioridad en la validez del entorno radio-electrico.
- Las antenas con las que se labora son de volúmenes reducidos.
- Vigilancia dentro del intercambio particular del usuario en cuanto a datos.

Esto amerita a que las comunicaciones en tiempo real soporten el trafico de datos de voz además de los habituales datos. La seguridad es un punto muy fuerte al momento de especificar que red se desea utilizar ya que como mencionamos anteriormente las redes WLAN siempre se ha visto envueltan en problemas por falta de seguridad o de dispositivos que alerten el uso de la red por parte de usuarios no admitidos dentro del sistema.

Wimax propone una serie de características muy completas en materia de seguridad:

- **Autenticación de usuario e base a protocolo *EAP(Extensible Authentication Protocol)*.**
- **Autenticación del terminal por intercambio de certificados digitales que impiden la conexión de terminales no autorizados.**
- **Cifrado de las comunicaciones utilizando algoritmos como DES (*Data Encryption Standard*) o el AES (*Advanced Encryption Standard*), mucho más robustos que el *Wireless Equivalent Privacy (WEP)* utilizado inicialmente en WLAN. Adicionalmente cada servicio es**

cifrado con la asociacion especifica de clave publica/clave privada. (Univerdidad Politécnica Salesiana, 2013)

Capítulo 3: Simulación y Evaluación.

En el presente capítulo se realiza el diseño en MatLab/Simulink de una Red WiMAX para lo cual se utilizará la modulación digital de Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) y posteriormente se muestran los resultados obtenidos.

3.1. Parámetros de Simulación.

En esta sección se describen los parámetros de simulación de una Red WiMAX tales como los parámetros de transmisión, de canal y de OFDM.

3.1.1. Parámetros de modulación digital OFDM.

OFDM está compuesta por tres tipos de subportadoras: datos, pilotos y subportadoras nulas que son utilizados para bandas de guarda y de compensar la DC nula. El número de estas subportadoras determinará el tamaño requerido para la FFT (o IFFT). Una vez que la señal OFDM se convierte en el dominio del tiempo, una copia de la última parte del período de símbolo útil, denominada prefijo cíclico (CP), se adjunta al comienzo de cada símbolo para mantener la ortogonalidad de los tonos.

De todas estas características de símbolos OFDM, algunos parámetros se pueden definir. El estándar define dos tipos de parámetros, los parámetros fundamentales, que serán especificados por los usuarios o requisitos del sistema y los parámetros derivados, definidos en términos de los fundamentales. Los parámetros fundamentales que caracterizan el símbolo OFDM:

- ✓ BW : ancho de banda nominal del canal.
- ✓ N_{datos} : número de subportadoras de datos.
- ✓ N_{piloto} : número de subportadoras piloto.

- ✓ n_f : factor de muestreo, que se utiliza con BW y N_{usado} (número de subportadoras nulas) para determinar la separación de subportadoras y el tiempo útil de símbolo.
- ✓ G: proporción del tiempo CP en tiempo útil.

A continuación, se muestran los parámetros derivados, que son dependientes de los parámetros fundamentales, que son:

$$N_{usados} = N_{datos} + N_{piloto}$$

N_{FFT} : Número de puntos utilizados para realizar la FFT. Está especificada para ser la potencia más pequeña de dos y mayor que N_{usados} .

$$N_{FFT} = 2^{\lceil \log_2(N_{usados}) \rceil}$$

F_s : Frecuencia de muestreo.

$$F_s = \left\lceil \frac{n_f BW}{8000} \right\rceil 8000$$

Δf : Espaciamiento de subportadora.

$$\Delta f = \frac{F_s}{N_{FFT}}$$

T_b : Tiempo útil de símbolo.

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

T_g : Tiempo de CP.

$$T_g = GT_b$$

T_{sym} : Tiempo de símbolo OFDM.

$$T_{sym} = T_b + T_g$$

T_s : Tiempo de muestreo.

$$T_s = \frac{T_b}{N_{FFT}}$$

3.1.2. Parámetros de transmisión.

Además de los parámetros que describen el símbolo OFDM, se requieren otros parámetros con el fin de definir los parámetros para la transmisión, tales como la duración de la trama, el tamaño del paquete, o el número total de símbolos transmitidos en OFDM. Al igual que la sección anterior, se clasifican ya sea en función de los parámetros primarios o en los secundarios. Los parámetros principales son:

N_{train} : Número de formación de símbolos en una trama.

T_{tramas} : Duración de la trama.

Los siguientes parámetros dependen de cualquiera de los parámetros que definen el símbolo OFDM o de la transmisión.

N_{OFDM} : Número de símbolos transmitidos OFDM en una trama.

$$N_{OFDM} = \frac{T_{tramas}}{T_{sym}}$$

N_{Tsym} : Número total de símbolos transmitidos en una trama.

$$N_{Tsym} = N_{OFDM} + N_{train}$$

$N_{tx-datos}$: Número de símbolos de datos transmitidos.

$$N_{tx-datos} = N_{datos}N_{OFDM}$$

N_{tcb} : Número total de bits codificados por asignación de subcanales por símbolos OFDM.

$$N_{tcb} = N_{tx-datos}M_a$$

N_{tx-sym} : Número total de símbolos transmitidos.

$$N_{tx-sym} = N_{usados}N_{OFDM}$$

$S_{paquetes}$: Tamaño de paquete transmitido por la fuente.

$$S_{paquetes} = N_{OFDM}RN_{datos}M_a$$

3.1.3. Parámetros de canal.

Con el fin de definir el modelo de canal, varios parámetros necesitan ser especificados. En las simulaciones, se utilizarán los siguientes valores predeterminados:

- Frecuencia de muestreo del simulador de canal, $f_m = 100 \text{ MHz}$.
- Velocidad de la luz, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$
- Frecuencia de portadora, $f_c = 2 \text{ GHz}$
- Velocidad del abonado móvil, variante v
- Frecuencia Doppler máxima, $f_d = v \frac{f_c}{c}$
- Número de caminos del modelo de canal variable en el tiempo, $N_p = 8$. Este parámetro define el número de sinusoides utilizadas para el modelo de canal variante en el tiempo Rosa-Zheng.

Por otra parte, los valores requeridos para algunos de estos parámetros son descritos en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1: Valores de parámetros primarios.

Parámetros	Valores
N_{datos}	192
N_{piloto}	8
N_{train}	3
BW	Variable, desde 1.25 a 20 MHz, siendo un entero múltiplo de 1.25, 1.5 o 1.75 MHz.
n_f	a) Para anchos de banda de canal múltiplo de 1.75MHz, $n_f = 8/7$ b) Para anchos de banda de canal múltiplo de 1.5MHz, $n_f = 86/75$ c) Para anchos de banda de canal múltiplo de 1.25MHz, $n_f = 144/125$ d) Para anchos de banda de canal múltiplo de 2.75MHz, $n_f = 316/275$ e) Para anchos de banda de canal

	múltiple de 2MHz, $n_f = 57/50$ f) Para anchos de banda de canal no especificados, $n_f = 8/7$
G	$\frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \frac{1}{16}, \frac{1}{32}$
Número de subportadoras de guarda de frecuencia más baja.	28
Número de subportadoras de guarda de frecuencia más alta	27
Desplazamiento de frecuencia índice de subportadoras de guarda.	-128, -127, ..., -101 +101, +102, ..., +127
Desplazamiento de frecuencia índice de portadoras de guarda	-88, -63, -38, -13 +13, +38, +63, +88
T_{tramas} (ms)	2.5, 4, 5, 8, 10, 12.5, 20

Elaborado por: El Autor

3.2. Diferencias entre los parámetros WiMAX y Wi-Fi.

Hay varias diferencias entre los sistemas WiMAX y Wi-Fi al momento de realizar la simulación diferirán entre sí en algunos valores de los parámetros. Las principales diferencias entre ambos se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3. 2: Diferencias entre parámetros de simulación de WiMAX y Wi-Fi.

	WiMAX	Wi-Fi
N_{datos}	192	48
N_{piloto}	8	4
N_{FFT}	256	64
BW	Variable desde 1.25 a 20 MHz	Determinado en 20 MHz
Codificación	CC+RS	CC
CP	Variable	Determinada

Elaborado por: El Autor

3.3. Simulación de la Red WiMAX en Simulink.

En esta sección se describe una visión general del simulador de una Red WiMAX tal como se muestra en el diagrama de bloques completo del archivo de modelo Simulink de la figura 3.1. Una breve descripción de los diferentes bloques se expone con el propósito de ofrecer una mejor comprensión del sistema propuesto.

Los datos de una fuente binaria se codifican y se asignan primero en símbolos QAM. El bloque "Codificación TX" realiza estas operaciones. Se compone de un banco de siete fuentes diferentes, codificadores y mapeadores, cada uno de los cuales está optimizado para trabajar con una velocidad de datos diferente en función del esquema de modulación y de codificación que se utiliza.

El codificador, como se ha explicado, consiste en una concatenación de un exterior codificador Reed-Solomon con un codificador convolucional interior. Es un proceso de codificación flexible debido a la perforación de la señal, lo que permite diferentes velocidades de codificación. La última parte del codificador es un proceso de entrelazado para evitar bloques grandes de bits erróneos.

Una vez que los datos de la fuente se asignan en símbolos QAM, los símbolos OFDM deben construirse. Un símbolo OFDM está compuesto por 192 subportadoras de datos, 8 subportadoras piloto, 1 subportadora DC nula, y 55 portadores de guardia. Adicionalmente, en preámbulos consta de 3 símbolos OFDM anexados al comienzo de cada trama. Los preámbulos se forman con una secuencia de formación corta, seguido por una secuencia de formación larga, y el FCH.

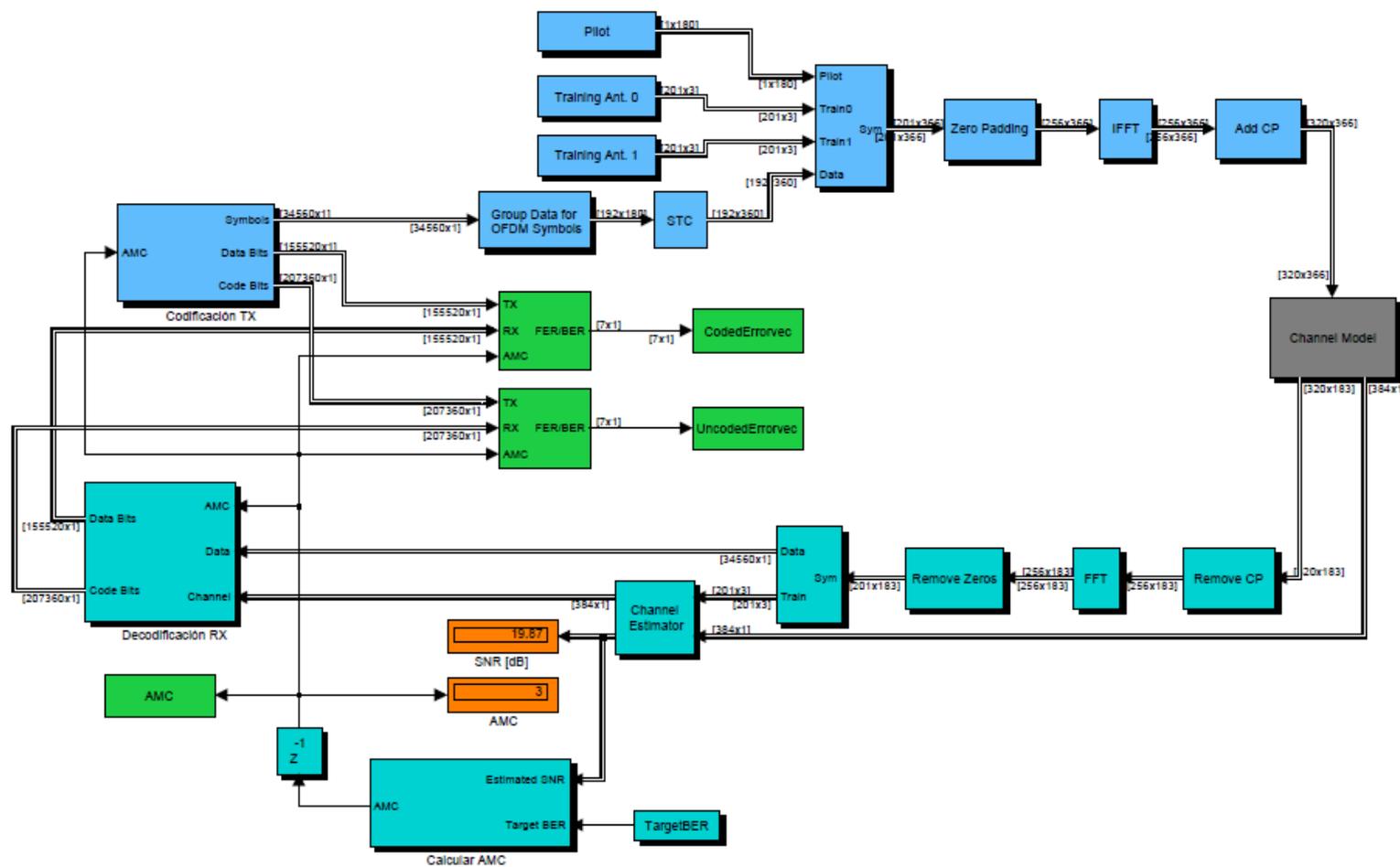


Figura 3. 1: Diagrama de bloques en Simulink para la simulación de una Red WiMAX.
Elaborado por: El Autor

Dependiendo del número de antenas de transmisión, se utilizan dos tipos de secuencias de formación largas. Si una sola antena está transmitiendo, la secuencia de formación larga utiliza 7 subportadoras, por lo tanto se llama P_{EVEN} . Sin embargo, otra formación de secuencias largas se utilizará para transmitir en tiempo espacio de ráfagas descendentes codificadas.

El esquema STC se logra mediante la transmisión de diversidad con dos antenas, un preámbulo tiene que ser transmitida desde ambas antenas de transmisión simultáneamente. Por lo tanto, la primera antena transmite un preámbulo usando P_{EVEN} y el preámbulo transmitido desde la segunda antena se ajusta de acuerdo a la secuencia de P_{ODD} , que utiliza, en este caso, un subconjunto de subportadoras impares.

Los bloques "Piloto", "Training Ant.0", y "Training Ant.1" generan las subportadoras piloto y dos secuencias de formación, respectivamente. Los símbolos de datos OFDM se obtienen después del vector de datos que van desde el bloque "Codificación TX" en forma de matriz que tiene 192 filas (número de subportadoras de datos en un símbolo OFDM).

El siguiente bloque, llamado "ensamblador", se ocupa de la tarea de reorganizar los datos, pilotos, formación y subportadora DC nula. Después del proceso de montaje, las 55 bandas de guarda se anexan al final de cada trama, la señal se convierte en el dominio del tiempo y se añade el prefijo cíclico. A continuación, la señal se envía a través del canal, que se implementa en el bloque "Modelo de canales".

El receptor realiza las operaciones inversas para obtener los datos transmitidos. El prefijo cíclico se elimina de cada símbolo y la señal se convierte en el dominio de la frecuencia usando un algoritmo FFT. Como se

ha dicho antes, un símbolo OFDM consiste en datos, piloto, formación, subportadora DC nula, y algunas bandas de guarda. Por lo tanto, se necesita de un proceso de separación de todas estas subportadoras.

En primer lugar, se eliminan las bandas de guarda y, a continuación, se realiza un desmontaje para obtener las subportadoras piloto, datos y formación. La subportadora de formación se utiliza para "estimador de canal". Los coeficientes de canal estimado se pueden utilizar en el demapeador para realizar una igualación de los símbolos de datos para compensar el desvanecimiento selectivo en frecuencia del canal de propagación por trayectos múltiples. Para ello, los datos se decodifican siguiendo los pasos inversos como se realizó en el transmisor.

Estos dos últimos pasos, de anulación de la correspondencia y la decodificación, se realizan en el bloque "Decodificación Rx". Como el bloque es análogo, consiste en un banco de siete creadores de mapas y decodificadores de donde la modulación adecuada y esquema de codificación es seleccionado por la señal de AMC que se explica a continuación.

El mecanismo de alimentación posterior de la modulación adaptativa y codificación (AMC) se realiza con el fin de permitir que el sistema pueda cambiar el esquema de modulación y así, mantener la calidad de la conexión y estabilidad de enlace, permitiendo así que el sistema supere el desvanecimiento selectivo en tiempo. Este mecanismo AMC funciona mediante la estimación de la SNR del canal, y en función de las condiciones deseadas de la canal establecido por un BER objetivo dado, el cambio de modulación y codificación. Estas operaciones se realizan en el bloque "Calcular AMC".

3.4. Resultados obtenido durante la simulación de WiMAX.

En la presente sección se muestran los resultados de la simulación que se presentan junto con los supuestos subyacentes. El objetivo es evaluar el comportamiento de la simulación, así como obtener una comprensión más exacta de la operación del sistema WiMAX. A través de numerosas comparaciones entre los resultados de simulación obtenidos con diferentes parámetros de simulación, algunas discusiones sobre el uso de estos diferentes parámetros y opciones se dan con el propósito de ofrecer una visión completa sobre la mejor manera de rendimiento de la transmisión.

Por lo tanto, se analizan no sólo los dos métodos de demapeador sino también el impacto de la estimación de canal. Además, la ganancia de transmisión se obtiene cuando se utilizan múltiples antenas en lugar de sólo una única antena en uno o ambos extremos del enlace de transmisión también se examinan. Los diferentes modelos de canal y los escenarios se aplican en diferentes simulaciones de modo que el fenómeno de desvanecimiento puede ser estudiado.

Para poner fin a los resultados cuando se activa el mecanismo de AMC, lo cual demuestra el incremento mencionado en la eficiencia espectral y transferencia de datos.

3.4.1. Simulación con única antena en transmisiones.

La presente sección muestra los resultados de simulación cuando se utiliza una sola antena no sólo en el transmisor, sino también en el receptor. Las suposiciones comunes a la mayoría de las simulaciones son los siguientes: la simulación se lleva a cabo para transmisiones de enlace descendente a una frecuencia de portadora de 2 GHz y un ancho de banda de canal de 20 MHz. La longitud del prefijo cíclico es definida por $G = 1/32$ y la duración de la trama se especifica para ser 2.5 ms. Por lo tanto, sólo los

cambios realizados en estas suposiciones serán mencionados a partir de ahora.

Esquemas de modulación y velocidades de codificación.

Ahora se realiza la comparación entre los diferentes esquemas de modulación y velocidades de codificación utilizados en el simulador. Estos resultados se obtienen en un canal AWGN, con un sistema que utiliza mínimos cuadrados de estimación de canal y demapeador duro. El rendimiento de diferentes esquemas de modulación y tasas de codificación probados se muestra en las figuras 3.2 y 3.3. Como se especifica en el estándar, WiMAX permite siete combinaciones diferentes de orden de modulación y velocidades de codificación, que se resumen brevemente en la tabla 3.3.

Tabla 3. 3: Esquemas de modulación y tasa de codificación.

Modo de AMC	Esquema de modulación	Velocidad de codificación general
AMC-1	2 PAM	1/2
AMC-2	4 QAM	1/2
AMC-3	4 QAM	3/4
AMC-4	16 QAM	1/2
AMC-5	16 QAM	3/4
AMC-6	64 QAM	2/3
AMC-7	64 QAM	3/4

Elaborado por: El Autor

Las curvas muestran la BER como una función de la energía de bit a la tasa de ruido $\left(\frac{E_b}{N_o}\right)$, que es una medida de la eficiencia de energía de un esquema de modulación. Si una mayor $\frac{E_b}{N_o}$ es necesaria para transferir datos

para un esquema de modulación dada, esto significa que se requiere más energía para cada transferencia de bits.

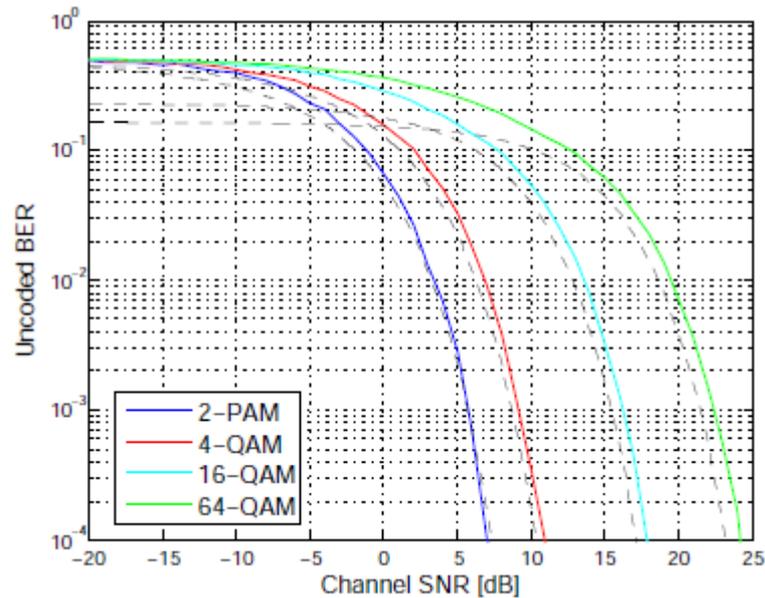


Figura 3. 2: Comparativa entre esquemas de modulación en el BER no codificado.
Elaborado por: El Autor

Baja eficiencia espectral de los esquemas de modulación, tales como 2 PAM y 4 QAM, requieren una menor $\frac{E_b}{N_o}$, y por lo tanto, son más eficientes energéticamente y menos vulnerable a bits erróneos. Además, la BER frente a la SNR puede calcularse a partir de $\frac{E_b}{N_o}$. La SNR para cada modulación tiene en cuenta el número de bits por símbolo, y por lo tanto, la potencia de la señal corresponde a la energía por bit veces el número de bits por símbolo.

Una comparación entre los diferentes esquemas de modulación y tasas de codificación se muestra en la figura 3.3, donde las curvas de BER codificado vs SNR se han trazado. Se puede observar que cuanto mayor es la tasa de código, la curva se desplaza a la derecha, y como se ha discutido para las curvas BER no codificado, mayor es el esquema de modulación, cuanto mayor sea la tasa de error de bit.

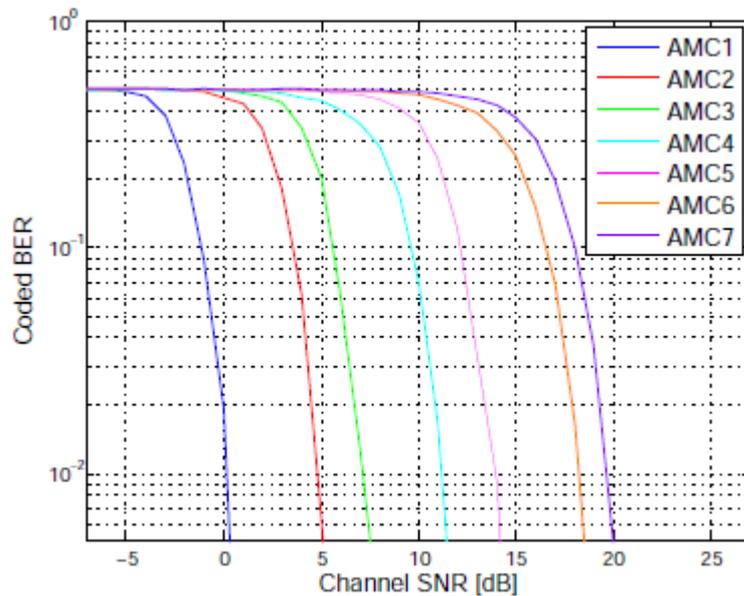


Figura 3. 3: Comparativa entre diferentes esquemas de modulación y tasas de codificación en la BER codificada.

Elaborado por: El Autor

Tipos de desvanecimiento de canal.

El desvanecimiento de diferentes canales y los efectos de la velocidad del usuario son tratados a través de la tesis. Tres tipos de desvanecimiento del canal se implementan en el simulador, el bloque de desvanecimiento, desvanecimiento variante en el tiempo, y el bloque de desvanecimiento de canal variante en el tiempo.

Como era de esperar, los experimentos de canal en tiempo variante arrojaron pésimos resultados, como consecuencia de los coeficientes del canal que varían. Con el fin de mejorar el rendimiento de este canal variante en el tiempo, un canal estimador variante en el tiempo podría ser implementado. El canal de bloque de desvanecimiento, que no tiene variación de sus coeficientes de canal a través de todo el proceso de transmisión, es el que obtiene mejores resultados en su lugar.

Estas observaciones, que consideran a los diferentes tipos de desvanecimiento, se muestran en la figura 3.4, donde los parámetros se fijan

para ser AMC-3, el conocimiento perfecto del canal, demapeador duro, y una velocidad de usuario, de 3 km/h.

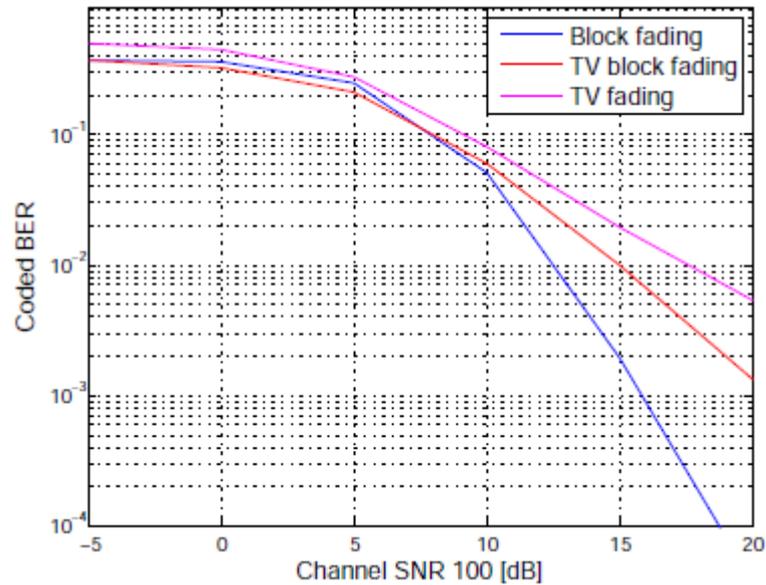


Figura 3. 4: Comparativa entre diferentes tipos de desvanecimiento.
Elaborado por: El Autor

También se discutirá la velocidad del terminal de usuario (véase la figura 3.5) en la cual el propósito es mostrar los gráficos del rendimiento del sistema, no solamente para las curvas BER no codificado, sino también para las curvas BER codificados, al pasar la señal a través de un canal variante en el tiempo, en el escenario F. Los parámetros utilizados en estas simulaciones son: demapeado suave, conocimiento de canal perfecto y AMC-3.

La figure 3.5 representa los resultados obtenidos para un canal variante en el tiempo. Se ha demostrado que la velocidad del usuario no constituye un factor importante al calcular la curva BER no codificado, lo que juega un papel fundamental en la curva BER codificada, donde, como se esperaba, cuanto menor son las velocidades mejores serán los resultados.

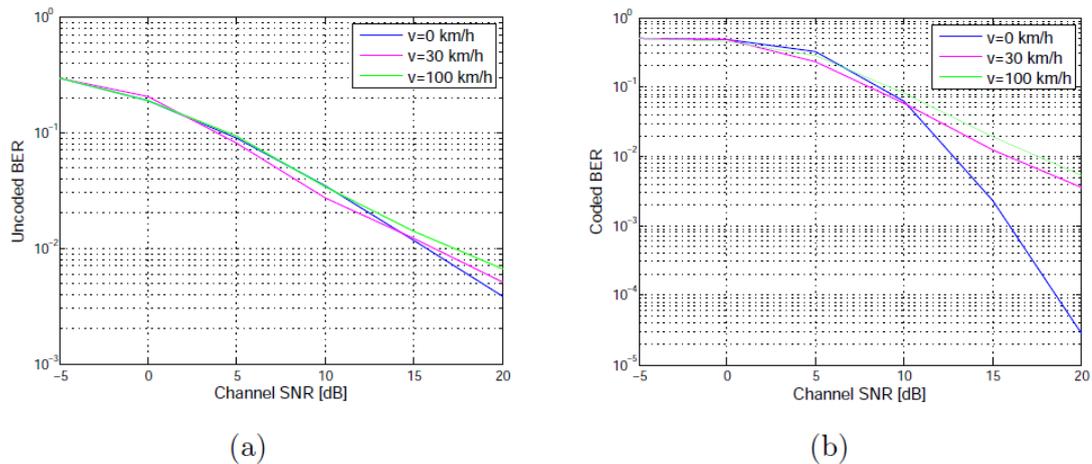


Figura 3. 5: Curvas BER vs. SNR en un canal variante en el tiempo para el escenario F.

Elaborado por: El Autor

3.4.2. AMC y sus efectos en los resultados.

Esta sección discute las consecuencias provocadas en los resultados cuando se aplica el mecanismo AMC. Varios aspectos, incluyendo el tipo de canal, la velocidad del usuario, o la estimación de canal, se analizan con este propósito, permitiendo así que nos demos cuenta de la mejora que ofrece AMC.

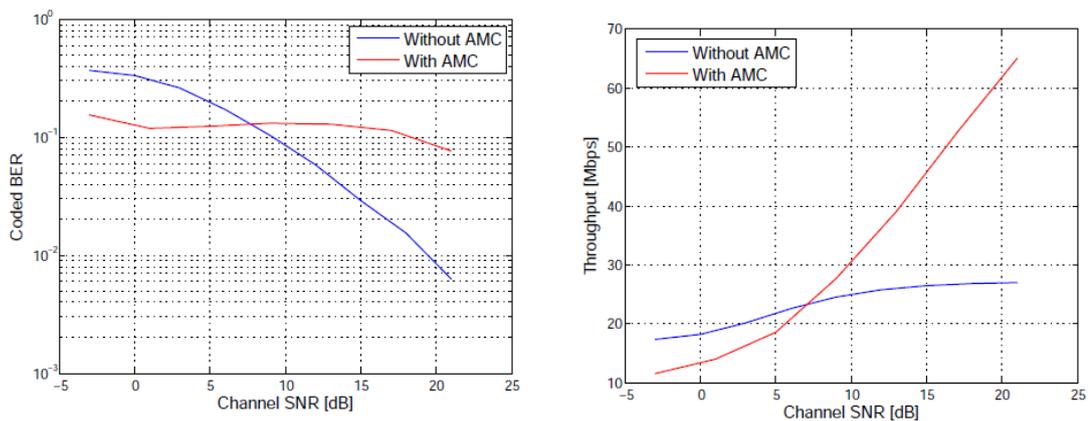


Figura 3. 6: Comparativa entre los resultados obtenidos con y sin utilizar el esquema AMC.

Elaborado por: El Autor

Para empezar, se realiza una comparación entre los resultados con y sin utilizar el esquema AMC ya mencionado. La figura 3.6 muestra el BER codificado y las curvas de rendimiento para un escenario en un canal de

desvanecimiento. Los parámetros de configuración siguen siendo tres: demapeado duro, conocimiento de canal perfecto y AMC-3. Los resultados muestran un aumento enorme en el rendimiento cuando se utiliza el mecanismo de AMC de aproximadamente 7 dB de SNR del canal en adelante. Por otro lado, el apoyo de un BER predecible, mantiene pequeñas variaciones alrededor de un valor fijo.

3.4.3. Simulación con múltiples antenas en transmisiones.

Los resultados obtenidos cuando utilizamos más de una antena o bien en el transmisor o en el receptor, o en ambos extremos del enlace de comunicaciones, son discutidos en esta sección. Como en los resultados para una sola antena, los supuestos comunes a todas las simulaciones son:

$$f_c = 2 \text{ GHz}; BW = 20 \text{ MHz}; G = \frac{1}{32}; T_{tramas} = 2.5 \text{ ms}; AMC = 3$$

Además, el algoritmo demapeado duro, perfecto conocimiento de los coeficientes del canal, y un bloque de canal de desvanecimiento son necesarios en la simulación. Se modelan los sistemas SISO, SIMO, MISO, y MIMO. El problema fundamental en los canales inalámbricos es el desvanecimiento.

Con el fin de combatir este desvanecimiento y, por tanto, mejorar la capacidad y el rendimiento del sistema, se utilizan múltiples antenas en ambos extremos del enlace de comunicación. En esta sección se analiza la mejora conseguida con estas estructuras, haciendo una comparación del funcionamiento no sólo de los sistemas con múltiples transmisores, sino también con múltiples antenas de recepción.

La figura 3.7 muestra el rendimiento del sistema mejorado drásticamente con un sistema de diversidad en su lugar, en este caso, con el escenario C. La pendiente de las curvas BER es un indicador del grado de diversidad que se ha logrado. El grado de diversidad se desafió como la

mejora del rendimiento en BER, en términos de potencia a menudo, para una mayor SNR de 10dB. Como se puede observar, la curva para el sistema 1x1 mejora su probabilidad de error con un factor de 10, es decir, la potencia de 1 para un aumento de 10 dB en SNR. En este caso, se dice que el grado de diversidad para ser igual a uno, es decir, sin diversidad en absoluto. Sin embargo, cuando se simula con un sistema 1x2 o 2x1, que tienen orden de diversidad de dos, se consigue un mejor rendimiento.

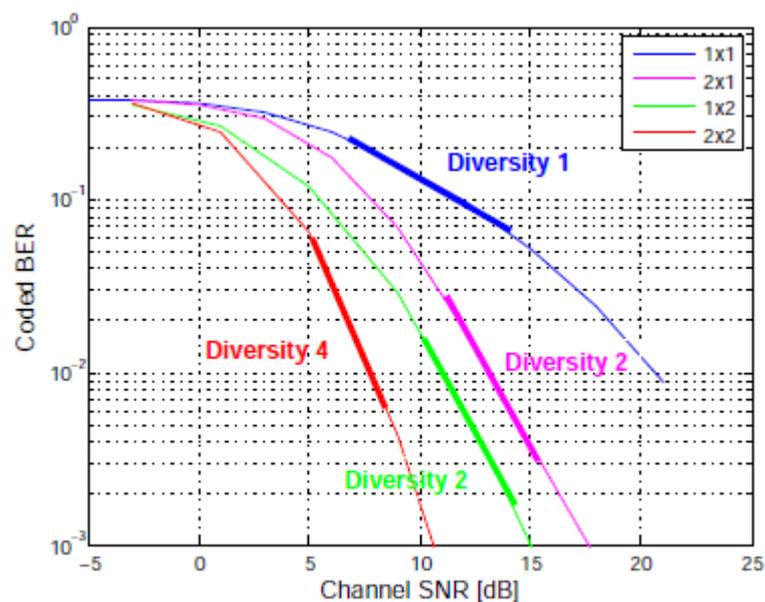


Figura 3. 7: Comparativa entre diferentes grados de diversidad.
Elaborado por: El Autor

Como sabíamos, el grado de diversidad logrado con el sistema 2x2 es de orden cuatro. Por lo tanto, se puede concluir que el grado de la diversidad es igual a $N_T N_R$, siendo N_T y N_R el número de antenas de transmisión y recepción, respectivamente. Además, se muestra que aunque ambos 1x2 y 2x1 logran el mismo grado de diversidad, el esquema utiliza múltiples antenas en el receptor para lo cual ofrece una mejora significativa de 3 dB de ganancia en la SNR del canal.

Esta ganancia se deduce de la fórmula de la señal recibida cuando se utiliza el esquema MRC y el Alamouti. Como sólo un símbolo se transmite en

un intervalo de tiempo con el algoritmo MRC, la unidad de potencia de transmisión media se logra en cada intervalo de tiempo, y la señal resultante no se multiplica por el factor medio como en el algoritmo de Alamouti.

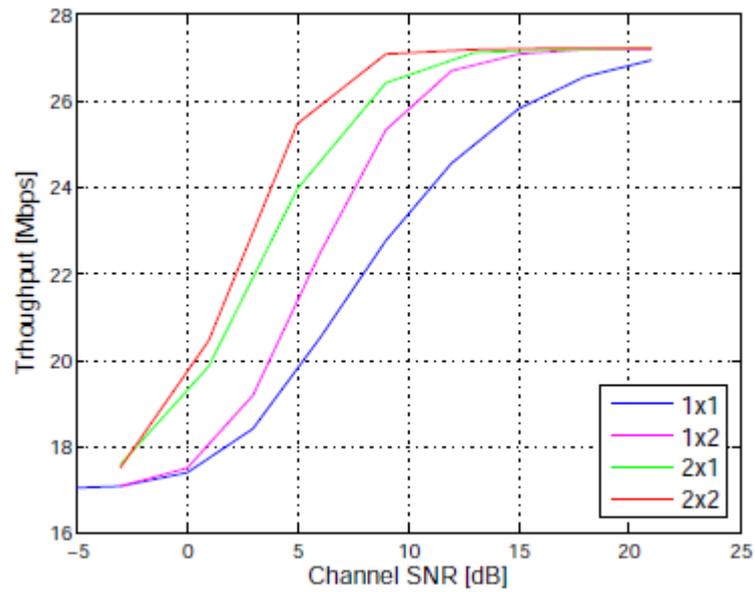


Figura 3. 8: Rendimiento del sistema usando esquemas de diversidad.
Elaborado por: El Autor

El rendimiento del sistema es analizado a continuación. La figure 3.9 muestra que cuanto mayor es el orden de diversidad se logra una mayor mejoría en el rendimiento del sistema.

Conclusiones

1. A través de los fundamentos teóricos de los sistemas inalámbricos WiMAX permitió establecer los principios básicos del funcionamiento en redes inalámbricas.
2. Los esquemas AMC y de codificación (códecs) emplean la modulación múltiple con el fin de adaptar instantáneamente eficiencia espectral a las variaciones en el canal de SNR mientras se mantiene una BER aceptable. El esquema implementado estima la SNR del canal para cada trama y lo compara con un conjunto de umbrales SNR obtenidos de tal manera que garanticen un BER por debajo de un objetivo determinado BER.
3. El códec asociado a cada umbral se alimenta de vuelta al transmisor a fin de que la adaptación se puede realizar. El esquema propuesto se ha demostrado ser eficaz desde aproximadamente 7 dB de SNR de canal en adelante, donde se logra un enorme aumento en el rendimiento del sistema con el uso del esquema de AMC.

Recomendaciones

1. Utilizar este trabajo como base para trabajos futuros que permitan modelar sistemas de comunicaciones inalámbricos como las redes WiMAX o cualquier otro sistema de telecomunicaciones.
2. Emplear diferentes esquemas de modulación digital en futuras simulaciones de sistemas de comunicaciones utilizando cualquier medio de transmisión.

Referencias Bibliográficas

Akhtman, J. (2010). MIMO-OFDM for LTE, WiFi and WiMAX: Coherent versus non-coherent and cooperative turbo transceivers . *John Wiley & Sons*, 1.

Alasti, M. N. (2010). Quality of service in WiMAX and LTE networks. *Communications Magazine, IEEE*, 104-111.

Byrne, D. (2013, Mayo 3). WiMAX Advanced podría permitir la conexión a dispositivos LTE. (R. A. Junquera, Interviewer)

Espías Fernández, M. (2007, 01 23). *Contribución al estudio de la viabilidad de operadores de telecomunicaciones de acceso inalámbrico fijo mediante el desarrollo de escenarios tecno-económicos*. Madrid: ETSIT de la Universidad Politécnica de Madrid. Retrieved from <http://oa.upm.es/867/>

García, R. C. (2014). Evaluación de la Calidad del Servicio para Voz sobre Protocolo de Internet (VoIP) en Redes WIMAX sobre Ambientes IP/MPLS. *Información tecnológica*, 24-38.

Krouk, E., & Semenov, S. (2011). *Modulation and Coding Techniques in Wireless Communications*. Wiley.

Li, Q., Li, G., Lee , W., Lee, M., Mazzaresse , D., Clerckx, B., & Li, Z. (2010). MIMO techniques in WiMAX and LTE: a feature overview. *Communications Magazine, IEEE*, 86-92.

Mario Casado García, Á. S. (2008, 10 3). *Universidad de Valladolid*. Retrieved from <http://mecg.es/archivos/DSSI1%20-%20Bloque1.pdf>

Ocampo, J., Martínez, F., Moreno, M., & González, J. (2015, Febrero 15). *WiMAX*. Retrieved from <http://sx-de-tx.wikispaces.com/WiMAX>

Pijo Pérez, L. (2013, Junio). *Diseño de una Red WiMAX para el Valle de Churín - Lima*. Lima: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ.

Rendón Gallón, Á., Ludeña González, P., & Martínez Fernández, A. (2011). *Tecnologías de la Información y las Comunicaciones para zonas rurales: Aplicación a la atención de salud en países en desarrollo*. Madrid: CYTED.

So-In, C. J. (2010). Capacity evaluation for IEEE 802.16 e mobile WiMAX. *Journal of Computer Systems, Networks, and Communications*, 1.

UNAM. (2012). Retrieved from Universidad Nacional Autónoma de Mexico: <http://www.unam.mx/>

Univerdidad Politécnica Salesiana. (2013). Retrieved from <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/214/4/Capitulo%203.pdf>

Wimax Forum. (2015, 01 01). Retrieved from <http://www.wimaxforum.org/about>

Zapata, F. A. (2011, Enero 01). *Universidad Politecnica Nacional*. Retrieved from bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2677/1/CD-3362.pdf