



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Rendimiento de la capa física del estándar IEEE 802.16 usando  
diferentes esquemas de modulación**

AUTOR:

Monserrate Coello, Ricardo José

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de  
**MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**

TUTOR:

Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, a los 30 días del mes de junio del año 2017



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magíster **Monserate Coello, Ricardo José** como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de **MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

---

Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DEL PROGRAMA

---

Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, a los 30 días del mes de junio del año 2017



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Monserate Coello, Ricardo José**

**DECLARÓ QUE:**

El trabajo de titulación “**Rendimiento de la capa física del estándar IEEE 802.16 usando diferentes esquemas de modulación**”, previa a la obtención del grado Académico de **Magíster en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

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

Guayaquil, a los 30 días del mes de junio del año 2017

EL AUTOR

---

Monserate Coello, Ricardo José



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **Monserate Coello, Ricardo José**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del trabajo de titulación de Maestría titulado: **“Rendimiento de la capa física del estándar IEEE 802.16 usando diferentes esquemas de modulación”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 30 días del mes de junio del año 2017

EL AUTOR

---

Monserate Coello, Ricardo José

# REPORTE DE URKUND

**URKUND**

**Documento** [Ricardo Monserrate\\_Final.docx](#) (D29283839)

**Presentado** 2017-06-09 02:43 (-05:00)

**Presentado por** fernandopm23@hotmail.com

**Recibido** edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com

**Mensaje** Revisión Ricardo Monserrate [Mostrar el mensaje completo](#)

2% de estas 21 páginas, se componen de texto presente en 3 fuentes.

Lista de fuentes		Bloques
+	Categoría	Enlace/nombre de archivo
+		<a href="http://docplayer.es/36323033-Universidad-catolica-d...">http://docplayer.es/36323033-Universidad-catolica-d...</a>
+		<a href="#">FINAL_TESIS_RL_01122016_FINAL_MAESTRIA_1_2.docx</a>
+		<a href="#">TESIS - ING.NESTOR TALLEDO A LIGHT.docx</a>
+		<a href="https://www.xuletas.es/ficha/espacio-tramas/">https://www.xuletas.es/ficha/espacio-tramas/</a>
+		<a href="http://docplayer.es/6014634-Universidad-nacional-d...">http://docplayer.es/6014634-Universidad-nacional-d...</a>

0 Advertencias. Reiniciar Exportar Compartir

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL SISTEMA DE POSGRADO MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA: Rendimiento de la capa física del estándar IEEE 802.16 usando diferentes esquemas de modulación

AUTOR: Monserrate Coello, Ricardo José

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de Magister en Telecomunicaciones

TUTOR: Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

15 de Junio del 2017

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

## **Dedicatoria**

Mi Trabajo de Titulación lo dedico con todo amor y cariño a las personas más importantes en mi vida mis padres, mi hermana, mi sobrina, mi esposa y mi hijo que siempre me apoyaron en los buenos y difíciles momentos, en lo moral y económico.

Mis amigos por permitir aprender más de la vida a su lado esto es posible gracias a ustedes.

## **Agradecimientos**

Agradezco a Dios Padre Todo Poderoso por permitir alcanzar otra meta más en mi vida, a mis padres por su apoyo incondicional a mi hermana por ser mi ejemplo a seguir, mi Tutor Msc Ing. Edwin Palacios por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad, conocimiento, su manera de trabajar y su motivación para guiarme durante el Trabajo de Titulación.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_

**PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO**

TUTOR

f. \_\_\_\_\_

**CÓRDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO**

REVISOR

f. \_\_\_\_\_

**RUILOVA AGUIRRE, MARÍA LUZMILA**

REVISOR

f. \_\_\_\_\_

**ROMERO PAZ MANUEL DE JESÚS**

DIRECTOR DEL PROGRAMA

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS .....	XIII
Resumen .....	XIVV
Abstract.....	XV
Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.....	166
1.1.    Introducción.....	166
1.2.    Antecedentes.....	177
1.3.    Definición del problema .....	188
1.4.    Objetivos.....	188
1.5.    Hipótesis.....	188
1.6.    Metodología de investigación.....	188
Capítulo 2: Fundamentos de redes inalámbricas y WiMAX.....	220
2.1.    Introducción a redes inalámbricas.....	220
2.2.    Arquitectura inalámbrica.....	223
2.3.    Enrutamiento de tráfico en redes inalámbricas.....	224
2.3.1.    Conmutación de circuitos.....	234
2.3.2.    Conmutación de paquetes.....	234
2.4.    Protocolos en tiempo real.....	245
2.4.1.    Protocolo de transporte en tiempo real.....	245
2.4.2.    Protocolo de control de transporte en tiempo real.....	256
2.5.    Capas del estándar IEEE 802.11 y OSI.....	256
2.5.1.    Nivel de transporte.....	257
2.5.2.    Nivel de red.....	267
2.5.3.    Enlace de datos y capa física .....	268
2.6.    Estándares de LAN inalámbricas.....	279
2.7.    Descripción de WiMAX.....	30
2.8.    Antecedentes históricos.....	30
2.9.    Arquitectura de redes WiMAX .....	32

2.10. Capa física de WiMAX.....	335
2.10.1. Fundamentos de multiplexación por división de frecuencias ortogonales.....	346
2.10.2. Modulación y codificación adaptativa.....	357
2.10.3. Velocidades de datos - WiMAX.....	368
2.11. Capa de control de acceso al medio - WiMAX.....	368
2.12. Calidad de servicio en WiMAX.....	41
Capítulo 3: Simulación y Resultados Obtenidos.....	457
3.1. Descripción del componente práctico a desarrollar.....	457
3.2. Diseño de la etapa del transmisor para la red WiMAX.....	457
3.3. Configuración del canal inalámbrico para la red WiMAX.....	479
3.4. Diseño de la etapa del receptor para la red WiMAX.....	479
3.5. Evaluación de rendimiento de la capa física IEEE 802.16.....	50
3.5.1. Parámetros de atenuación en canales utilizados en la simulación.....	50
3.5.2. El efecto del canal sobre la constelación.....	51
3.6. Resultados del espectro del sistema WiMAX.....	57
Conclusiones.....	60
Recomendaciones.....	61
Bibliografía.....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 2:

Figura 2. 1: Arquitectura de infraestructura de estaciones base.....	21
Figura 2. 2: Comunicación de canales en una estación base inalámbrica.	212
Figura 2. 3: Arquitectura de una red inalámbrica. ....	223
Figura 2. 4: Formato de los protocolos RTP/RTCP.....	246
Figura 2. 5: Comparativa entre los niveles del modelo OSI versus 802.11.257	
Figura 2. 6: Estructura del datagrama IP. ....	268
Figura 2. 7: Capas de OSI y 802.....	279
Figura 2. 8: Evolución de los estándares de la tecnología WiMAX. ....	32
Figura 2. 9: Arquitectura de redes WiMAX.....	335
Figura 2. 10: Funciones de la capa MAC WiMAX. ....	379
Figura 2. 11: Mecanismos de calidad de servicio de WiMAX. ....	446

### Capítulo 3:

Figura 3. 1: Diagrama de bloques del transmisor de una WiMAX.....	457
Figura 3. 2: Diagrama de bloques del receptor de una WiMAX. ....	50
Figura 3. 3: Resultado de constelación QPSK después del canal AWGN...	52
Figura 3. 4: Resultado de constelación 16 QAM después del canal AWGN.	52
Figura 3. 5: Resultado de constelación 64 QAM después del canal AWGN.	53
Figura 3. 6: Resultado de constelación del canal multitrayecto de desvanecimiento plano para esquema de modulación 16 QAM. ....	524
Figura 3. 7: Resultado de constelación 16 QAM después de la ecualización. ....	535
Figura 3. 8: Resultado del efecto para canal de desvanecimiento dispersivo en la constelación 16 QAM. ....	546
Figura 3. 9: Resultado del ecualizador para canal de desvanecimiento dispersivo en la constelación 16 QAM. ....	557

Figura 3. 10: Resultado de la variación de SMs en el escenario 5. ....	568
Figura 3. 11: Resultado del símbolo OFDM.....	568
Figura 3. 12: Resultado del símbolo OFDMA. ....	579

## ÍNDICE DE TABLAS

### Capítulo 2:

Tabla 2. 1: Esquemas de modulación y codificación adaptativa en redes WiMAX.....	357
Tabla 2. 2: Esquemas WiMAX AMC .....	368
Tabla 2. 3: Clases de servicio de QoS para redes WiMAX.....	402

## Resumen

Después de los sistemas de comunicaciones ópticos, las comunicaciones inalámbricas siguen funcionando y evolucionando ya sean para redes fijas (WLAN) o móviles (WiMAX y telefonía celular). Ambos sistemas de comunicaciones trabajan en forma conjunta, la una siempre depende de la otra. Se realizó una búsqueda bibliográfica de los estándares de comunicaciones inalámbricas en especial de WiMAX y compara las capas de IEEE 802 con el modelo OSI. Dentro de WiMAX se describe la capa física y la calidad de servicio (QoS). El trabajo de titulación consiste en modelar una red WiMAX para evaluar el rendimiento a nivel de la capa física que opera con la multiplexación por división de frecuencias ortogonales empleando diferentes esquemas de modulación digital. Se utilizaron tres canales, AWGN, desvanecimiento plano y dispersivo entre la etapa de transmisión y recepción. Los resultados obtenidos durante la ejecución de la simulación demostraron como se eliminaba el ruido utilizando los esquemas de modulación.

**Palabras claves:** CANALES, AWGN, DESVANECIMIENTO, DISPERSIVO, CAPAS, WIMAX

## **Abstract**

After optical communications systems, wireless communications continue to function and evolve for either fixed (WLAN) or mobile (WiMAX and cellular) networks. Both communication systems work together, the one always depends on the other. A bibliographic search of the wireless communications standards in particular of WiMAX was made and it compares the layers of IEEE 802 with the OSI model. Within WiMAX, the physical layer and quality of service (QoS) are described. The titling work consists of modeling a WiMAX network to evaluate performance at the level of the physical layer that operates with orthogonal frequency division multiplexing using different digital modulation schemes. Three channels, AWGN, flat and dispersive fading were used between the transmission and reception stage. The results obtained during the execution of the simulation demonstrated how the noise was eliminated using the modulation schemes.

**Keywords:** CHANNELS, AWGN, FADING, DISPERSIVE, LAYERS, WIMAX

## **Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.**

### **1.1. Introducción.**

Los sistemas de comunicación inalámbrica han experimentado un tremendo crecimiento en las últimas dos décadas. Si bien se espera que este crecimiento continúe sin disminuir, el éxito continuo de las redes inalámbricas depende de su capacidad para utilizar eficientemente recursos de red limitados para satisfacer cada vez más requisitos de calidad de servicio (QoS). Si bien se espera que los enlaces inalámbricos de mayor capacidad satisfagan la creciente demanda de QoS de las aplicaciones multimedia, estos enlaces de alta velocidad de datos también resultan en un aumento del consumo de energía del dispositivo. (Miao, Himayat, Li, & Talwar, 2012)

Li, Qin, Low, & Gwee, (2007) proporcionan un panorama general de la tecnología móvil WiMAX y su desarrollo. Se refieren principalmente a la prestación de servicios de calidad de servicio y la especificación WiMAX móvil. También ponen de relieve problemas potenciales derivados de las aplicaciones. Ellos se enfocan en el estudio de la tecnología WiMAX móvil, incluyendo soporte de movilidad, transferencia y servicios de multidifusión. (Selvarani & Ravi, 2014)

La estimación de canales es una técnica importante especialmente en sistemas de redes inalámbricas móviles en los que el canal inalámbrico cambia con el tiempo, generalmente causado por el emisor y/o receptor que están en movimiento. La comunicación móvil inalámbrica se ve afectada de manera adversa por la interferencia por trayectos múltiples resultante de las reflexiones desde el entorno, tales como colinas, edificios y otros obstáculos. La estimación de canal se basa en la secuencia de entrenamiento de bits y que es única para un cierto transmisor y que se repite en cada ráfaga transmitida

## **1.2. Antecedentes.**

Nisar, Hijazi, & Lawal, (2015) WiMAX inicialmente ha sido una tecnología emergente, proporcionando altas velocidades de flujo de datos y una estable comunicación inalámbrica en distancias largas y cortas. WiMAX es el nombre creado por el "WiMAX Forum" en el año 2001. En el artículo de Santhoshkumar & Ponmuthuramalingam, (2015) sostienen que el futuro de las tecnologías inalámbricas parece ser muy brillante, es decir, que WiMAX es la tecnología de comunicación más reciente para la transmisión inalámbrica

El WiMAX Forum describe WiMAX como "una tecnología basada en estándares que permite la entrega del acceso inalámbrico de banda ancha de última milla como una alternativa al cable y DSL". Dado que la tecnología WiMAX no es más que la implementación de una red de área metropolitana inalámbrica de banda ancha, correspondiente a la familia del estándar IEEE 802.16 también se denomina WMAN. (Wang, 2011)

Los anteriores párrafos de esta sección indican las bases elementales de WiMAX, posteriormente, se realiza una búsqueda de información de trabajos a fines al tema en mención. Por ejemplo, el trabajo de los autores Dube & Dhanashetti, (2013) realizaron la estimación de la pérdida de trayectoria, siendo muy importante en el despliegue inicial de la red inalámbrica y de planificación celular. Utilizaron la simulación de modelos de propagación debido a que los equipos de medición son de alto coste.

En el trabajo de los autores (Mohamed, Zaki, & Mosbeh, 2010) utilizaron en la capa física WiMAX el acceso múltiple de división de frecuencia ortogonal (OFDMA) y también, las técnicas de modulación adaptativa: BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM. y a su vez, el concepto de prefijo cíclico que añade bits adicionales en el extremo del transmisor. La señal se transmite a través de los canales y se recibe en el extremo del receptor. Este trabajo fue de gran ayuda para evaluar el rendimiento de la capa física del estándar IEEE 802.16.

### **1.3. Definición del problema**

Los equipos de mediciones en tiempo real para redes inalámbricas en especial WiMAX son muy costosos para comprobar el rendimiento de una red, en especial si requerimos la evaluación de la capa PHY. De tal manera, surge la necesidad de evaluar el rendimiento de la capa física del estándar IEEE 802.16 usando diferentes esquemas de modulación.

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo General:**

Evaluar el rendimiento de la capa física del estándar IEEE 802.16 usando diferentes esquemas de modulación.

#### **1.4.2. Objetivos específicos:**

- ✓ Fundamentar las bases teóricas de las redes inalámbricas, estándares y de WiMAX.
- ✓ Diseñar los escenarios de simulación de las etapas de transmisión y recepción de la red WiMAX utilizando la plataforma MatLab/Simulink.
- ✓ Evaluar los resultados obtenidos de los canales de desvanecimientos y de esquemas de modulación utilizados en la simulación.

### **1.5. Hipótesis**

La evaluación de la capa física IEEE 802.16 permitirá verificar el rendimiento de WiMAX utilizando diferentes canales de desvanecimientos y esquemas de modulación digital.

### **1.6. Metodología de investigación.**

Existen algunos tipos de investigación, tales como: descriptiva, analítica, aplicada, fundamental, conceptual y empírica. También, estos tipos de investigación pone de relieve el hecho de que hay dos enfoques básicos de la investigación, a saber, el enfoque cuantitativo y el enfoque cualitativo. El primero implica la generación de datos en forma cuantitativa que pueden

someterse a rigurosos análisis cuantitativos de forma formal y rígida. Este enfoque cuantitativo puede ser subclasificado en enfoques: inferenciales, experimentales y de simulación para la investigación.

- a) **Inferenciales**, el propósito de este enfoque de investigación es formar una base de datos a partir de la cual se puede inferir características o relaciones de población. Esto suele significar una encuesta donde se estudia una muestra de población (cuestionada u observada) para determinar sus características, y se infiere que la población tiene las mismas características.
- b) **Experimentales**, se caracterizan por un control mucho mayor sobre el entorno de investigación y en este caso algunas variables son manipuladas para observar su efecto sobre otras variables.
- c) **Simulación**, implica la construcción de un entorno artificial en el que se pueden generar información y datos relevantes. Esto permite observar el comportamiento dinámico de un sistema (o su subsistema) bajo condiciones controladas. El término "simulación" se refiere a "la operación de un modelo matemático que representa la estructura de un proceso dinámico. Dados los valores de las condiciones iniciales, los parámetros y las variables exógenas, se ejecuta una simulación para representar el comportamiento del proceso a través del tiempo". El enfoque de simulación también puede ser útil en la construcción de modelos para entender las condiciones futuras.

Finalmente, se puede indicar que el trabajo de titulación utiliza un diseño de investigación descriptivo, fundamental y empírico, con enfoque cuantitativo basada en la simulación de un modelado de red WiMAX para evaluar el rendimiento utilizando diferentes canales de desvanecimiento y de ruido gaussiano blanco aditivo.

## Capítulo 2: Fundamentos de redes inalámbricas y WiMAX.

### 2.1. Introducción a redes inalámbricas.

Las redes inalámbricas se utilizan principalmente para comunicaciones inalámbrica fijas y móviles, en sí, la red inalámbrica es una red informática que es inalámbrica, interconectando nodos sin usar cables. Puede ser de dos tipos de LAN inalámbrica o Wireless MAN. El estándar IEEE para redes inalámbricas es 802.11 y la banda utilizada es 2,5 GHz mientras se utilizan los protocolos definidos por los estándares IEEE 802.11 e IEEE 802.11b.

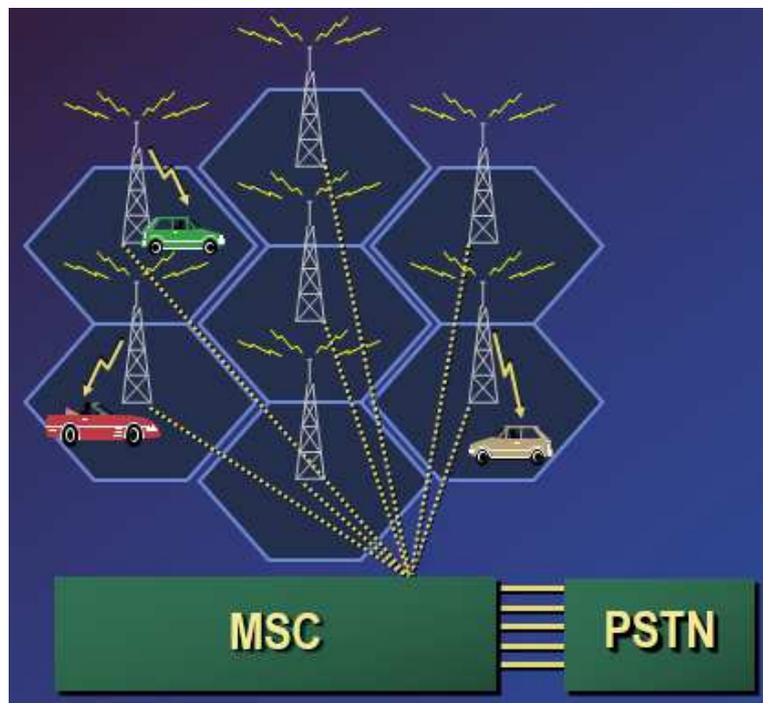


Figura 2. 1: Arquitectura de infraestructura de estaciones base.

Elaborado por: Autor

Las redes móviles requieren infraestructura de estaciones bases (*Base Station, BS*) y que estas BSs, a su vez, están conectados (véase la figura 2.1) a centrales de conmutación móvil (*Mobile Switching Center, MSC*) o la oficina de conmutación de telefonía móvil (*Mobile Telephone Switching Office, MTSO*). Este concentrador central proporciona conectividad a redes de telefonía pública conmutada (*Public Switched Telephone Network, PSTN*) facilitando el acceso global al abonado que se conectan a las BSs.

El suscriptor móvil se conecta a través de una BS y enlaces de radio que se establecen mediante la interfaz de aire común (*Common Air Interface, CAI*) conocido como apretón de manos. Esto especifica cuatro canales a saber:

1. Canal de voz directo (*Forward Voice Channel, FVC*), transmisión de voz de la BS a cada dispositivo móvil.
2. Canal de control directo (*Forward Control Channel, FCC*) y canal de control inverso (*Reverse Control Channel, RCC*), ambos son utilizados para iniciar llamadas.
3. Canal de voz inverso (*Reverse Voice Channel, RVC*), transmisión de voz desde el dispositivo móvil hasta la BS.

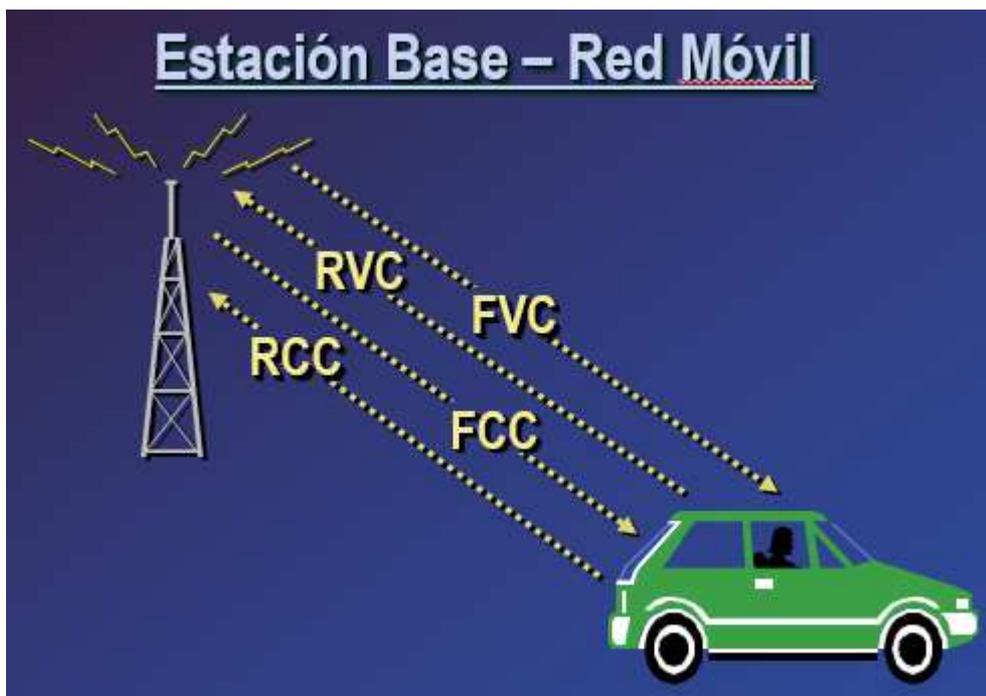


Figura 2. 2: Comunicación de canales en una estación base inalámbrica.  
Elaborado por: Autor

La MSC o MTSO está conectado a la BS a través de enlaces de línea fija o de microondas. Aquí, la MSC es responsable de establecer la conexión también con la PSTN, y la BS parece el puente entre el móvil y la MSC para el apretón de manos siempre que el móvil quiere establecer la llamada. La MSC se mueve a los canales no utilizados informando a la BS, FVC y RVC

entran en acto cambiando la frecuencia. Una vez que la llamada está en progreso, la MSC sigue cambiando el canal para mantener una buena calidad de voz.

## 2.2. Arquitectura inalámbrica.

En la actualidad se está dependiendo mucho de las redes inalámbricas, ya sean fijas o móviles. Se ha convertido en una parte integral de nuestra vida como la gente suele moverse libremente de un lugar a otro y no permanecer sentado en un solo lugar. Pueden existir algunos tipos de arquitecturas, pero uno de ellas se muestra en la figura 2.3. Esta arquitectura es la combinación de cableado e inalámbrico que se integra para realizar la funcionalidad. Los datos deben entregarse entre muchos dispositivos como ordenadores portátiles, móviles y otros dispositivos. Aquí una de las funcionalidades es proporcionar VoIP para los dispositivos como móviles y portátiles.

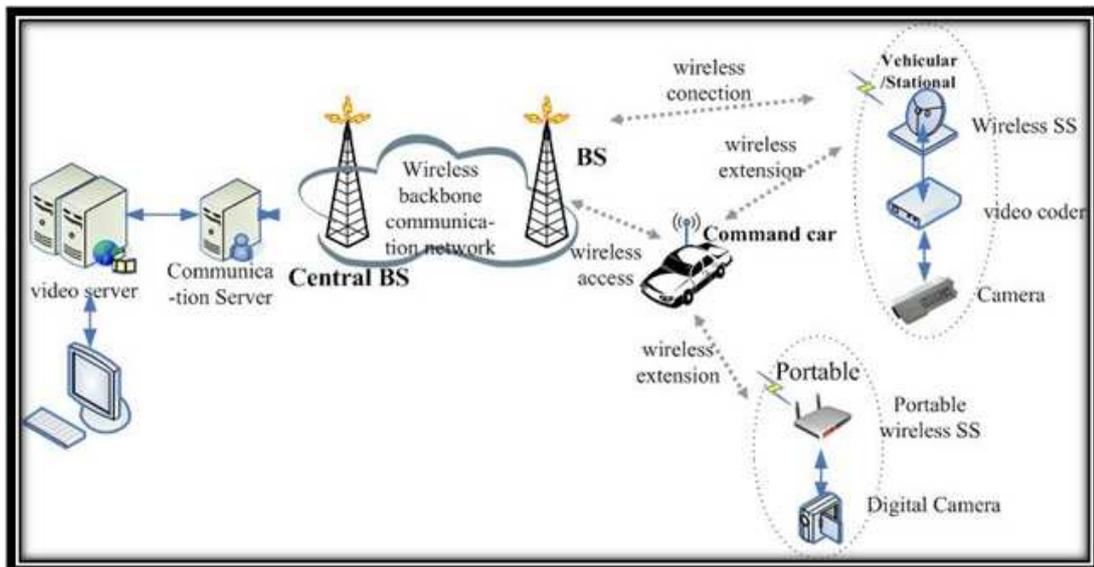


Figura 2. 3: Arquitectura de una red inalámbrica.

Fuente: (Vanet, 2017)

## 2.3. Enrutamiento de tráfico en redes inalámbricas.

En el entorno inalámbrico, el conocimiento del tipo de tráfico debe estar en la prioridad principal. El tráfico de voz necesita un enlace dedicado y la entrega debe ser en tiempo real, mientras que parte del tráfico no necesita

enviarse tiempo real. Existen dos tipos de técnicas de enrutamiento orientadas a la conexión y enrutamiento sin conexión.

- a) En la ruta de enrutamiento orientada a la conexión está dedicada entre el transmisor (Tx) y el receptor (Rx) de modo que se reconoce la integridad de los datos enviados. El control de errores se mantiene y si la llamada se rompe, el remitente tiene que retransmitir los datos y repetir todo el procedimiento de nuevo.
- b) Mientras que, el enrutamiento sin conexión no tiene canales fijos. Los datos enviados son en forma de paquetes que a su vez forman un mensaje. El paquete puede ser alterado y se reordenan en el extremo del receptor. La retransmisión no se realiza en el tipo de enrutamiento.

### **2.3.1. Conmutación de circuitos.**

En el ancho de banda de la conmutación de circuitos se define incluso antes de que comuniquen las partes de comunicación que tendrán que comunicarse en el canal asignado a ellos. Un canal de voz es dedicado por la MSC entre BS y PSTN durante todo el tiempo en que la llamada está activa. Puede haber traspaso (conocido como Handoff) pero el enlace se mantiene entre la MSC y PSTN. El circuito no admite la comunicación inalámbrica debido a su período inactivo que resulta en la rotura de las señales. Concluyendo, la conmutación de circuitos es confiable y se establece una comunicación libre de errores.

### **2.3.2. Conmutación de paquetes.**

En los datos de conmutación de paquetes se transfiere en forma de paquete y ese canal, también es compartido por otras partes de comunicación. Se pueden tomar diferentes rutas por cada paquete según la información y dependiendo del tipo de conmutación. Para garantizar la demora y la eliminación de errores, se define la longitud máxima del paquete y se agrega cantidad adicional de información para proporcionar información de origen y destino. En el extremo del receptor se disponen o se ensamblan los datos. La

transferencia de datos no necesita un enlace dedicado ya que los datos se dividen en trozos y éstos deben ser transportados al receptor, ya que la estrategia adoptada es compartir el recurso. Los protocolos X.25 e IP son los ejemplos de conmutación de paquetes.

## 2.4. Protocolos en tiempo real.

Existen dos tipos de protocolos en tiempo real que son utilizados para la comunicación inalámbrica.

### 2.4.1. Protocolo de transporte en tiempo real.

El protocolo de transporte en tiempo real (*Real-time Transport Protocol, RTP*) es útil para la comunicación en tiempo real y es el que define el formato de paquete. Los protocolos RTP se utilizan para la transmisión de audio y vídeo en ambientes multicast y unicast. Se ejecuta a través del protocolo de datagramas de usuario (*User Datagram Protocol, UDP*) y es parte de la capa de aplicación. RTP realiza la encapsulación de los datos y es muy utilizado en la telefonía IP. En la figura 2.4 se muestra el formato del protocolo de transporte en tiempo real.

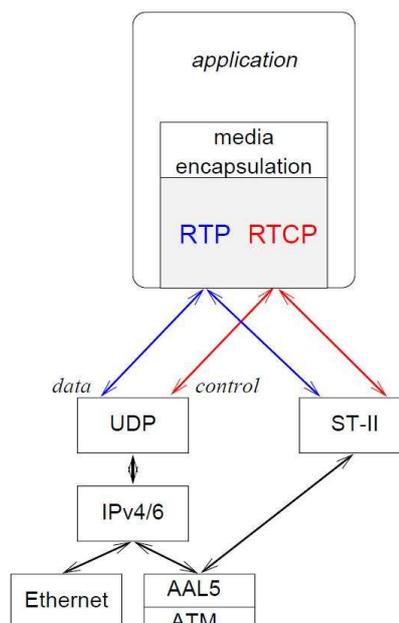


Figura 2. 4: Formato de los protocolos RTP/RTCP.  
Fuente: ("Multimedia Streaming Protocols", 2010)

## 2.4.2. Protocolo de control de transporte en tiempo real.

El protocolo de control de transporte en tiempo real (*Real-time Transport Control Protocol, RTCP*) por lo general funciona con el protocolo RTP y por la combinación de los dos datos multimedia se transporta entre las partes que son el remitente y el receptor. Ese punto de uso proporciona comentarios sobre los servicios como QoS proporcionado por RTP. La diferenciación de paquetes que se transmite se realiza a través de los puertos. El puerto más alto es utilizado por RTCP que un RTP.

## 2.5. Capas del estándar IEEE 802.11 y OSI.

El estándar IEEE 802.11b consta de cinco capas que son aplicación, transporte, red, enlace de datos y capa física. Cada una de ellas serán brevemente descritas:



Figura 2. 5: Comparativa entre los niveles del modelo OSI versus 802.11.

Fuente: (Patiño, 2011)

### 2.5.1. Nivel de transporte.

La capa de transporte proporciona servicio a la capa de aplicación que es posterior a ella mediante el protocolo UDP. UDP es necesario para enviar

datos en voz sobre IP (*Voice over IP, VoIP*) en su umbral mínimo y no es confiable en ningún contexto, ya que no proporcionan el mecanismo para evitar la pérdida de paquetes. El protocolo de control de transmisión (TCP) también es utilizado por la capa de transporte para la entrega de paquetes.

### 2.5.2. Nivel de red.

La capa de red utiliza el protocolo de internet (Internet Protocol, IP) que es responsable del enrutamiento de datagramas entre el enrutador y la estación de trabajo. El formato IP Datagram en IPv4 es:

32bits			
Versión	Cabecera	Tipo de Servicio	Longitud de datagrama (bytes)
Identificador de 16 bits		Banderas Flags	Fragmentación offset 13 bits
Tiempo de vida	Protocolo de capa superior	Cabecera de comprobación (checksum)	
Dirección IP de origen de 32 bits			
Dirección IP de destino de 32 bits			
Opciones			
Datos si los hay			

Figura 2. 6: Estructura del datagrama IP.

Fuente: (Abad Camarero, 2014).

Elaborado por: Autor.

### 2.5.3. Enlace de datos y capa física

La capa de enlace de datos moviliza los datagramas y la capa física mueve el nodo de bits al nodo. El enlace de datos se divide en dos: (a) control de enlace lógico (*Logical Link Control, LLC*), y (b) control de acceso al medio

(*Medium Access Control, MAC*) mientras que la capa física se divide en el procedimiento de convergencia de capa física (*Physical Layer Convergence Procedure, PLCP*) y el medio físico dependiente (*Physical Medium Dependent, PMD*).

ISO/OSI Data Link Layer	802.2 Logical Link Control (LLC)		
	802.11 Media Access Control (MAC)		
ISO/OSI Physical Layer (PHY)	802.11 Physical Layer Convergence Protocol (PLCP)		
	PMD 802.11 Infrared	PMD 802.11 FHSS Frequency Hopping Spread Spectrum	PMD 802.11 DSSS Direct Sequence Spread Spectrum

Figura 2. 7: Capas de OSI y 802.

Fuente: (Beer, 2004)

## 2.6. Estándares de LAN inalámbricas.

Hay varias familias, pero la más común de los estándares es IEEE 802.11:

- a) 802.11b: trabaja con BW = 11 Mbps con una frecuencia de 2,4 GHz.
  - Utiliza la modulación de espectro ensanchado de secuencia directa (*Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS*) y codificación de código complementario (*Complementary Code Keying, CCK*).
  - Estándar ampliamente utilizado, con 14 canales disponibles.
  - Menos puntos de acceso (*Access Point, AP*) para cobertura en áreas grandes.
  
- b) 802.11a: trabaja BW = 54 Mbps con una frecuencia de 5 GHz.
  - La modulación utilizada es OFDM.
  - Se requieren mayor cantidad de APs en relación al estándar 802.11b para una mayor cobertura de área.
  - Interferencia menor de radiofrecuencia (*Radio Frequency, RF*).

- Admite aplicaciones de videos ya que el ancho de banda es mayor en relación al estándar 802.11b.
- c) 80211 g: trabaja con BW de hasta 54 Mbps a una frecuencia de 2,4 GHz.
- Utiliza la modulación OFDM o DSS.

Utiliza dos mecanismos de seguridad, que son: WPA (inalámbrico) y WEP (cable). WPA no es confiable, por lo que WEP es el mecanismo de seguridad que se utiliza para el cifrado.

IEEE 802.16 es estándar de WiMAX con ancho de banda de 75 Mbps, utilizado en Wireless MAN (WMAN), y el mecanismo de seguridad utilizado es AES y la modulación OFDM y DES3. Más adelante se describe en detalle la tecnología WiMAX. Hay muchos otros pero no son parte de la descripción teórica del trabajo de titulación.

## **2.7. Descripción de WiMAX**

La interoperabilidad mundial para acceso a Microondas (Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX) es una prometedora alternativa de 3G y la LAN inalámbrica para proporcionar conectividad de última milla por enlaces de radio debido a su área de cobertura grande, bajo costo de despliegue y altas tasas de datos.

Para Asanza Q. & Cisneros P., (2010), WiMAX se basa en estándares inalámbricos de redes de área metropolitana (WMAN) desarrollados por el grupo IEEE 802.16 y adoptados por el grupo IEEE y ETSI HIPERMAN. Un amplio consorcio de la industria, el WiMAX Forum, es responsable de la certificación de productos inalámbricos de banda ancha para la interoperabilidad y el cumplimiento con el estándar WiMAX.

## **2.8. Antecedentes históricos.**

En 1998, el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (*Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE*) formó un grupo para trabajar en el nuevo estándar IEEE 802.16. El enfoque inicial del grupo fue el desarrollo de un estándar de interfaz aérea para el sistema de banda ancha inalámbrica punto a multipunto basado en entornos con línea de vista (*Line Of Sight, LOS*) para operar en la banda de 10-66 GHz. El estándar fue aprobado en diciembre de 2001 y se basó en técnicas de modulación de una sola portadora con multiplexación por división de tiempo (TDM) en ráfagas y soporta tanto Duplexación por División de Frecuencia (*Frequency Division Duplexing, FDD*) como Duplexación por División de Tiempo (*Time Division Duplexing, TDD*).

Para incluir aplicaciones en entornos sin línea de vista (*Non Line Of Sight, NLOS*) y reducir el coste de los dispositivos terminales, el grupo posteriormente modificó el estándar a IEEE 802.16a utilizando la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (*Orthogonal Frequency Division Multiple, OFDM*) en la banda 2-11 GHz. Tras nuevas revisiones, en 2004 se produjo un nuevo estándar, denominado IEEE 802.16d-2004, que sustituyó a todas las versiones anteriores y formó la base de la primera solución WiMAX. En la figura 2.8 se muestra la evolución de los estándares en la tecnología WiMAX.

En diciembre de 2005, el grupo completó y aprobó la norma IEEE 802.16e-2005, una enmienda a la norma de 2004 que agregó soporte de movilidad. La norma de 2005 constituye la base de las aplicaciones nómadas y móviles y se denomina a menudo WiMAX móvil. Con la terminación de la norma IEEE 802.16e-2005, el interés en el grupo WiMAX y WiMAX Forum se ha desplazado hacia el despliegue y certificación de perfiles de sistemas WiMAX móviles basados en el nuevo estándar. Cabe señalar aquí que las especificaciones de las normas del 2004 y 2005 se limitan a los conceptos de control y de plano de datos de la interfaz aérea.

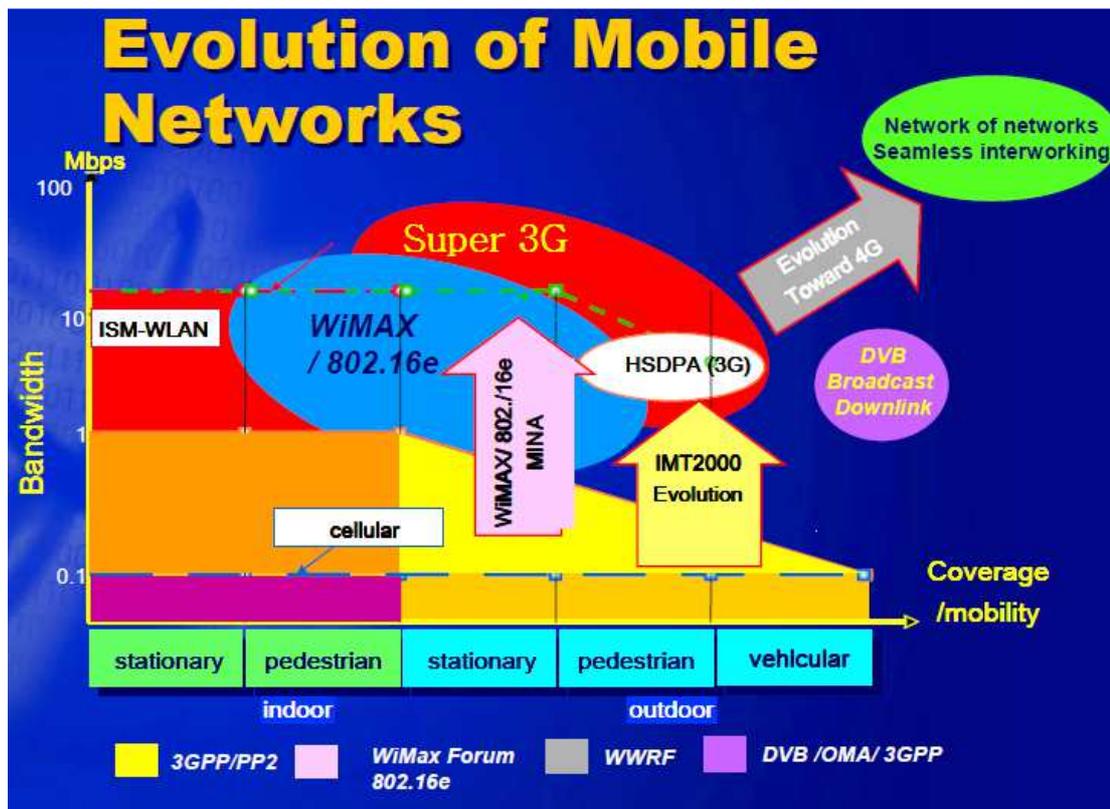


Figura 2. 8: Evolución de los estándares de la tecnología WiMAX.  
Fuente: (Kahn, 2005)

El grupo de trabajo de la red WiMAX Forum, desarrollo una arquitectura completa de la red de extremo a extremo para tratar aspectos de la gerencia del servicio y de la red y llenar algunas de las piezas faltantes.

### 2.9. Arquitectura de redes WiMAX

El estándar IEEE 802.16e proporciona la interfaz de aire para WiMAX móvil, pero no define la red de extremo a extremo. El Grupo de Trabajo de Red del Grupo WiMAX (NWG), es responsable de desarrollar los requisitos de red de extremo a extremo, la arquitectura y los protocolos para WiMAX móvil usando IEEE 802.16e como la interfaz aérea. (Talledo Aguilar, 2012)

Además, hay otros aspectos completamente definidos en el estándar WiMAX móvil, pero no hay implementaciones de consideración en el WiMAX Forum. Esto es importante tener en cuenta, ya que solamente WiMAX Forum

probó y marcó dispositivos que fueron utilizados por los operadores de WiMAX en todo el mundo, logrando tener dispositivos aprobados para ser interoperables.

El WiMAX NWG ha desarrollado un modelo de referencia de red para servir como marco de arquitectura para despliegues de WiMAX y para asegurar la interoperabilidad entre varios equipos y operadores de WiMAX (Talledo Aguilar, 2012) . El modelo de referencia de red prevé una arquitectura de red unificada para soportar despliegues fijos, nómadas y móviles y se basa en un modelo de servicio IP.

El modelo de referencia de red desarrollado por el WiMAX NWG define una serie de entidades funcionales e interfaces entre esas entidades (las interfaces se denominan puntos de referencia). (Talledo Aguilar, 2012)

- Estación Móvil (*Mobile Station, MS*): la MS es utilizada por el usuario final para acceder a la red.
- Red de acceso a servicios (*Access Services Network, ASN*): La ASN comprende una o más BSs y una o más pasarelas ASNs que forman la red de acceso de radio.
- Estación base: La BS es responsable de proporcionar la interfaz aérea a la MS. Funciones adicionales que pueden ser parte de la BS son las funciones de gestión de micro-movilidad, tales como activación de traspaso y establecimiento de túneles, gestión de recursos de radio, aplicación de políticas QoS, clasificación de tráfico, protocolo de control dinámico del host (*Dynamic Host Control Protocol, DHCP*) y de gestión de grupo de multidifusión.
- Acceso a la puerta de enlace de la red de servicios (*ASN GateWay, ASN-GW*): la pasarela ASN normalmente actúa como un punto de agregación de tráfico de la capa 2 dentro de un ASN. Las funciones adicionales que pueden formar parte de la pasarela ASN incluyen administración de ubicaciones intra-ASN y paginación, administración

de recursos de radio y control de admisión, almacenamiento en caché de perfiles de abonado y claves de cifrado, funcionalidad de cliente, establecimiento y gestión de túnel de movilidad con estaciones base, QoS e implementación de políticas, funcionalidad de agente extranjero para IP móvil y enrutamiento al CSN seleccionado.

- Red de servicios de conectividad (*Connectivity Service Network, CSN*): el CSN proporciona conectividad a Internet, a proveedores de servicios de aplicaciones (*Application Service Provider, ASP*), otras redes públicas y redes corporativas. El CSN incluye servidores AAA que admiten la autenticación de los dispositivos, usuarios y servicios específicos. El CSN también proporciona administración de políticas de QoS y de seguridad por usuario. El CSN también es responsable de la gestión de direcciones IP, el soporte para roaming entre diferentes NSPs, la gestión de ubicaciones entre ASNs y la movilidad y roaming entre ASNs. Además, CSN también puede proporcionar puertas de enlace e interactuar con otras redes, tales como PSTN, 3GPP y 3GPP2.

Además de las entidades funcionales, la arquitectura de referencia define interfaces, llamadas puntos de referencia, entre entidades funcionales. Las interfaces llevan protocolos de control y gestión, en su mayoría protocolos de red y capa de transporte desarrollados por IETF, en apoyo de varias funciones, como la movilidad, la seguridad y la calidad de servicio, además de datos de portador. La figura 2.9 ilustra puntos de referencia entre entidades funcionales (R1, R2, R3, etc...), además se observa algunas de las entidades funcionales más importantes.

Además, el marco de la arquitectura está diseñado de tal forma que los multi-jugadores pueden formar parte de la cadena de valor del servicio WiMAX para permitir un ecosistema más rico para el negocio de servicios WiMAX,

llevando a una mayor competencia y, por lo tanto, mejores servicios. La arquitectura permite tres entidades comerciales separadas:

- Proveedor de acceso a la red (*Network Access Provider, NAP*): posee y opera la ASN.
- Proveedor de servicios de red (*Network Service Provider, NSP*): proporciona conectividad IP y servicios WiMAX a suscriptores que utilizan la infraestructura ASN proporcionada por uno o más NAPs.
- Proveedor de servicios de aplicaciones (*Application Service Provider, ASP*): proporciona servicios de valor agregado, como aplicaciones multimedia y VPN corporativas que se ejecutan en la parte superior de IP.

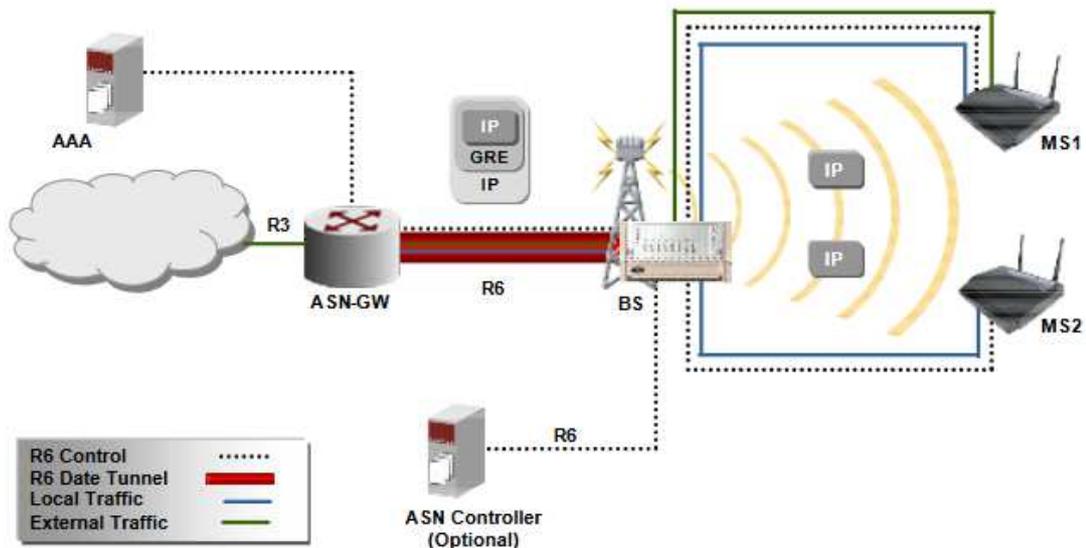


Figura 2. 9: Arquitectura de redes WiMAX.

Fuente: (Ryal, 2017)

## 2.10. Capa física de WiMAX.

La capa física WiMAX se basa en la multiplexación ortogonal por división de frecuencia (OFDM). OFDM es el esquema de transmisión de elección para permitir la alta velocidad de datos, video y comunicaciones multimedia y es utilizado por una variedad de sistemas comerciales de banda ancha. Mientras que, OFDMA proporciona un funcionamiento y una operación mejorados de trayectoria múltiple en entornos sin de línea de visión (NLOS). OFDMA

escalable (SOFDMA) se introduce en la enmienda del estándar IEEE 802.16e para soportar anchos de banda de canal escalable.

### **2.10.1. Fundamentos de multiplexación por división de frecuencias ortogonales.**

OFDM pertenece a una familia de esquemas de transmisión llamada modulación multiportadora, que se basa en la idea de dividir una corriente de datos de alta tasa de bits dada en varios flujos de velocidad de bits inferior paralelos y modular cada flujo en portadoras separadas, a menudo llamadas subportadoras o tonos. Los esquemas de modulación de múltiples portadores eliminan o minimizan la interferencia entre símbolos (ISI) haciendo que el tiempo del símbolo sea suficientemente grande para que los retardos inducidos por el canal sean una fracción insignificante (típicamente <10 %) de la duración del símbolo.

Por lo tanto, en sistemas de alta velocidad de datos en los que la duración del símbolo es pequeña, siendo inversamente proporcional a la división de la velocidad de datos la corriente de datos en muchos flujos paralelos aumenta la duración del símbolo de cada flujo de tal manera que la propagación del retardo es sólo una pequeña fracción de la duración del símbolo. OFDM es una versión espectralmente eficiente de la modulación multiportadora, en la que las subportadoras se seleccionan de tal manera que son todas ortogonales entre sí durante la duración del símbolo, evitando así la necesidad de tener canales subportadoras no superpuestos para eliminar la interferencia entre portadoras.

Para eliminar completamente el ISI, se utilizan intervalos de guarda entre símbolos OFDM. Haciendo que el intervalo de guarda sea mayor que la propagación esperada de retardo de trayectos múltiples, en otras palabras, ISI puede eliminarse por completo. La adición de un intervalo de guarda, sin

embargo, implica desperdicio de energía y una disminución en la eficiencia de ancho de banda.

### 2.10.2. Modulación y codificación adaptativa.

WiMAX admite una variedad de esquemas de modulación y codificación adaptativa (AMC) y permite que el esquema cambie en una base de ráfagas por ráfagas por cada enlace, dependiendo de las condiciones del canal, ya sea con desvanecimiento plano o dispersivo. Utilizando el indicador de realimentación de calidad de canal, la estación móvil puede proporcionar a la estación base retroalimentación sobre la calidad del canal de enlace descendente. Para el enlace ascendente, la estación base puede estimar la calidad del canal, en base a la calidad de la señal recibida. La tabla 2.1 proporciona una lista de los diversos esquemas de modulación y codificación soportados por WiMAX.

Tabla 2. 1: Esquemas de modulación y codificación adaptativa en redes WiMAX.

	Enlaces descendentes	Enlaces ascendentes
Modulación	BPSK QPSK 16 QAM 64 QAM BPSK (opcional para OFDM-PHY)	BPSK QPSK 16 QAM 64 QAM (opcional)
Codificación	Obligatorio: códigos convolucionales a tasas 1/2, 2/3, 3/4, 5/6  Opcional: códigos turbo convolucionales a tasas 1/2, 2/3, 3/4, 5/6  Códigos de repetición a tasas 1/2, 1/3, 1/6  LDPC  Códigos RS para OFDM-PHY	Obligatorio: códigos convolucionales a tasas 1/2, 2/3, 3/4, 5/6  Opcional: códigos turbo convolucionales a tasas 1/2, 2/3, 3/4, 5/6  Códigos de repetición a tasas 1/2, 1/3, 1/6  LDPC

Fuente: (Andrews, Ghosh, & Muhamed, 2007)

### 2.10.3. Velocidades de datos - WiMAX

Debido a que la capa física de WiMAX es bastante flexible, el rendimiento de la velocidad de datos varía en función de los parámetros operativos. Los parámetros que tienen un impacto significativo en la tasa de datos de la capa física son el ancho de banda del canal y el esquema de modulación y codificación utilizado. Otros parámetros, como el número de subcanales, el tiempo de protección OFDM y la tasa de sobre muestreo, también tienen un impacto. A continuación, se muestra la velocidad de datos de la capa PHY en varios anchos de banda de canal, así como los esquemas de modulación y codificación mostrados en la tabla 2.2.

Tabla 2. 2: Esquemas WiMAX AMC

Ancho de Banda del canal	3,50 MHz	1,25 MHz	5 MHz	10 MHz	8,75 MHz					
Modo PHY	256 OFDM	128 OFDMA	512 OFDMA	1024 OFDMA	1024 OFDMA					
Sobremuestreo	8/7	28/25	28/25	28/25	28/25					
Modulación y velocidad de código	Velocidad de datos capa PHY (Kbps)									
	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
BPSK, 1/2	946	326	NO APLICABLE							
QPSK, 1/2	1882	653	504	154	2520	653	5040	1344	4464	1120
QPSK, 3/4	2822	979	756	230	3780	979	7560	2016	6696	1680
16 QAM, 1/2	3763	1306	1008	307	5040	1306	10080	2688	8928	2240
16 QAM, 3/4	5645	1958	1512	461	7560	1958	15120	4032	13392	3360
64 QAM, 1/2	5645	1958	1512	461	7560	1958	15120	4032	13392	3360
64 QAM, 2/3	7526	2611	2016	614	10080	2611	20160	5376	17856	4480
64 QAM, 3/4	8467	2938	2268	691	11340	2938	22680	6048	20088	5040
64 QAM, 5/6	9408	3264	2520	768	12600	3264	25200	6720	22320	5600

Fuente: (Andrews et al., 2007; Putra, Kai-Wei Ke, & Ho-Ting Wu, 2009)

### 2.11. Capa de control de acceso al medio - WiMAX.

El protocolo MAC WiMAX, es un protocolo MAC centralizado que utiliza métodos de acceso híbridos que combinan las principales propiedades del acceso aleatorio y los protocolos de acceso son garantizados. Utiliza la

asignación de la demanda para facilitar y apoyar mecanismos eficientes de QoS. Fundamentalmente la capa MAC-WiMAX, al igual que cualquier otra capa MAC se encuentra entre la capa de red y la capa física de la pila OSI. Sin embargo, la capa MAC WiMAX se subdivide en tres subcapas con diferentes funcionalidades. La figura 2.10 es una ilustración básica de las tareas y servicios que son responsables de las subcapas MAC.

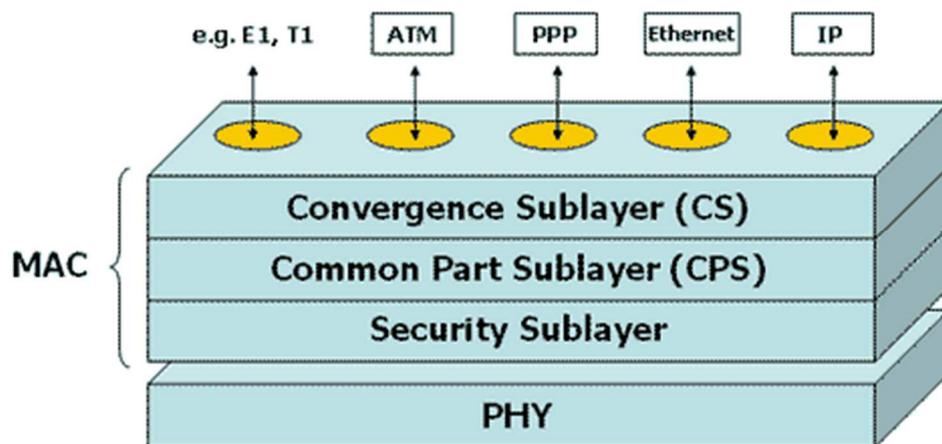


Figura 2. 10: Funciones de la capa MAC WiMAX.  
Fuente: (Sripol, 2008)

Las funcionalidades de las subcapas MAC WiMAX se describen brevemente a continuación:

- La Subcapa de Convergencia (Convergence Sub-layer, CS): la función principal de la CS es la clasificación de los paquetes de capa superior entrantes que se hace a través de identificadores de flujo de servicio (*Service Flow Identifiers, SFID*). Los paquetes recibidos de las unidades de datos de servicio de MAC (*MAC Service Data Units, MSDU*) de capa superior, están organizados en unidades de datos de protocolo MAC (*MAC Protocol Data Units, MPDU*) para transmisión por aire. El inverso se hace para los paquetes recibidos desde el ayer inferior. El CS también admite la supresión de encabezado MSDU para reducir los overheads de capa superior en cada paquete. El CS proporciona interfaz con una variedad de protocolos de capa superior como ATM, IP, Ethernet y cualquier protocolo futuro desconocido.

- La subcapa de la parte común (*Common Part Sub-layer, CPS*): la CPS se considera la subcapa principal de la capa MAC, ya que la mayoría de las funcionalidades fundamentales de la MAC se manejan en esta sub-cap. Algunas de las funciones son: operaciones de PDU, gestión de conexión, programación, control de enlace de aire, entrada de red, transferencia, administración de energía, servicio de difusión multicast (MBS), solicitud de repetición automática (ARQ) e híbrido ARQ.
- La sub-cap de seguridad (*Security Sub-layer, SS*): la SS es responsable de funciones como soporte para privacidad, autenticación de usuario/dispositivo y administración de claves.

La capa MAC WiMAX en la BS es totalmente responsable de la asignación de ancho de banda a todos los MSs, en ambas direcciones de enlace descendente y enlace ascendente. Para el enlace descendente, la MS no está involucrada y la BS asigna ancho de banda a cada MS basándose en las necesidades del tráfico entrante. Para el enlace ascendente, la asignación de ancho de banda se basa en solicitudes de la MS (asignación de demanda). El estándar IEEE 802.16e soporta varios mecanismos mediante los cuales un MS puede demandar ancho de banda.

Este proceso, que se llama división (Polling), puede realizarse individualmente (unicast) o en grupos (multicast). En el sondeo de multidifusión, la ranura asignada para realizar peticiones de ancho de banda es una ranura compartida. La norma define un mecanismo de contención con un algoritmo de retroceso para controlar el acceso a la ranura compartida. El procedimiento de asignación de ancho de banda puede resumirse de la siguiente manera:

- El MS obtiene una oportunidad de petición de ancho de banda (unicast o multicast).
- El BS responde a la solicitud de ancho de banda con una respuesta de solicitud de ancho de banda.

- La MS transmite su mensaje de solicitud de ancho de banda (que contiene el tamaño de solicitud de ancho de banda).
- Tras la aprobación, la BS asigna los recursos de radio necesarios a la MS y envía un mensaje de concesión de ancho de banda.

### **2.12. Calidad de servicio en WIMAX.**

El soporte para calidad de servicio (*Quality of Service, QoS*) es una parte fundamental del diseño de capa MAC IEEE 802.16e. El estándar hace cumplir una MAC orientada a la conexión para lograr un control avanzado de QoS. Un identificador de conexión (*Connection Identifier, CID*) se utiliza para dirigir de manera única la transmisión de datos a través de un enlace particular. Además, se utiliza el identificador de flujo de servicio (SFID) para distinguir el flujo unidireccional de paquetes con parámetros de QoS particulares. La BS es responsable de emitir SFIDs y de mapearlos a un único CID. Estos parámetros de QoS podrían incluir los siguientes:

- Prioridad de tráfico.
- Tasa máxima de reserva.
- Tasa máxima sostenida.
- Velocidad de ráfaga máxima.
- Tasa de reserva mínima.
- Latencia máxima.
- Jitter tolerado.
- Tipo de programación.
- Política de solicitud / transmisión (tipo y tamaño de PDU, mecanismo de solicitud de ancho de banda).
- Tipo ARQ.

El estándar IEEE 802.16e incluye el mecanismo QoS en la arquitectura de capas MAC. Entre otras cosas, la capa MAC es responsable de programar el ancho de banda para diferentes usuarios. La capa MAC realiza la asignación de ancho de banda basada en los requisitos del usuario, así como

en sus perfiles QoS. El estándar está diseñado para soportar una amplia gama de aplicaciones. Estas aplicaciones pueden requerir diferentes niveles de QoS. Para acomodar estas aplicaciones, el estándar 802.16e ha definido cinco clases de flujo de servicio. La tabla 2.3 resume las clases de servicio soportadas en WiMAX junto con sus parámetros de QoS asociados y ejemplos de aplicación.

El Servicio de Subvenciones no Solicitadas (UGS) está diseñado para soportar aplicaciones en tiempo real (con requisitos estrictos de retardo) que generan paquetes de datos de tamaño fijo a intervalos periódicos, como T1/E1 y VoIP sin supresión de silencio. El servicio garantizado se define para seguir de cerca el patrón de llegada de paquetes. Subvenciones de enlace ascendente son otorgadas por la BS independientemente de la estimación actual de la cartera; Por lo tanto, las conexiones UGS utilizan el mecanismo de solicitud de ancho de banda de concesión no solicitado. Así, las conexiones UGS nunca solicitan ancho de banda. Se le da ancho de banda periódico sin ningún sondeo o contención.

El tamaño de la subvención se calcula por la BS sobre la base de la tasa de tráfico reservada mínima, que se define como la cantidad mínima de datos transportados en la conexión cuando se promedia con el tiempo. Si se requiere un ancho de banda adicional, la MS puede solicitar a la BS que la encubre al ancho de banda asignado.

Tabla 2. 3: Clases de servicio de QoS para redes WiMAX.

Clase de servicio	Descripción	Parámetros de QoS	Ejemplos de aplicaciones
Servicio de concesión no solicitada (UGS)	Soporte de paquetes de tamaño fijo a velocidad de bits constante	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Frecuencia máxima sostenida</li> <li>✓ Latencia máxima</li> <li>✓ Tolerancia de fluctuación de fase (Jitter)</li> <li>✓ Política Requisito/Tx</li> </ul>	VoIP sin supresión de silencio
Servicios de sondeo en tiempo real (rtPS)	El servicio de soporte fluye la generación de paquetes de tamaño variable	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Tasa máxima sostenida</li> <li>✓ Velocidad mínima reservada</li> <li>✓ Latencia máxima</li> <li>✓ Política Requisito/Tx</li> </ul>	Transmisión de Audio y Video, MPEG.
Servicios de sondeo en tiempo no real (nrtPS)	Flujos de datos tolerantes a retardos de soporte	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Prioridad de tráfico</li> <li>✓ Tasa máxima sostenida</li> <li>✓ Velocidad mínima reservada</li> <li>✓ Política Requisitos/Tx</li> </ul>	Protocolo de transferencia de archivos (FTP)
Servicios de sondeo en tiempo real ampliado (ertPS)	Soporta aplicaciones en tiempo real con tasas de datos variables, pero requieren tasa de datos garantizadas y retardos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Prioridad de tráfico</li> <li>✓ Tasa máxima sostenida</li> <li>✓ Velocidad mínima reservada</li> <li>✓ Latencia máxima</li> <li>✓ Tolerancia a la fluctuación de fase</li> <li>✓ Política Requisitos/Tx</li> </ul>	VoIP con supresión de silencio
Mejor esfuerzo (BE)	Soporta flujos de datos que no requieren garantía de nivel de servicio mínimo	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Prioridad de tráfico</li> <li>✓ Tasa máxima sostenida</li> <li>✓ Política Requisitos/Tx</li> </ul>	Transferencia de datos, navegación web, etc.

Fuente: (Jakimoski & Janevski, 2013; Singh, Singh, & Malhotra, 2014)

El Servicio de Sondeo en Tiempo Real (rtPS), está diseñado para soportar aplicaciones en tiempo real (con requisitos de retardo menos exigentes) que generan paquetes de datos de tamaño variable a intervalos periódicos, tales como vídeo y videoconferencia MPEG.

Los parámetros claves de QoS para las conexiones rtPS son la tasa de tráfico reservada mínima, que tiene el mismo significado que con UGS, y la latencia máxima, que limita el tiempo de espera de un paquete en la capa MAC. Dado que el tamaño de los paquetes que llegan con rtPS no es fijo,

como lo es con aplicaciones adaptadas a UGS, las conexiones rtPS se requieren para notificar a la BS de sus requisitos de ancho de banda actuales. La BS concede periódicamente encuestas unicast a las conexiones rtPS. El periodo de Polling puede especificarse explícitamente como un parámetro QoS opcional, a saber, el intervalo de sondeo no solicitado.

La clase de servicio de sondeo en tiempo real (Extended Real-Time Polling Service, ertPS) fue agregada por la enmienda 802.16e. ertPS es un mecanismo de programación que se basa en la eficiencia de ambos UGS y rtPS. La BS proporciona subvenciones unicast de una manera no solicitada como en UGS, ahorrando así la latencia de una solicitud de ancho de banda. Sin embargo, mientras que las asignaciones de UGS son fijas en tamaño, las asignaciones de ertPS son dinámicas. El ertPS es adecuado para aplicaciones en tiempo real de tasa variable que tienen requisitos de velocidad de datos y retardo. Un ejemplo es la voz con detección de actividad.

A diferencia de los servicios de programación UGS y rtPS, el servicio de sondeo en tiempo real (nrtPS) y el servicio de mejor esfuerzo (BE) están diseñados para aplicaciones que no tienen ningún requisito de retardo específico. La principal diferencia entre los dos es que las conexiones nrtPS se reservan una cantidad mínima de ancho de banda (por medio del parámetro de tráfico mínimo reservado), lo que puede aumentar el rendimiento de las aplicaciones intensivas de ancho de banda, como FTP.

Tanto las conexiones de enlace ascendente nrtPS como BE solicitan ancho de banda ya sea respondiendo a sondeos de difusión desde la BS o cargando una solicitud de ancho de banda en una PDU saliente. Estas peticiones están basadas en contención. El siguiente procedimiento resume el mecanismo de QoS en WiMAX, que también se ilustra en la figura 2.11:

1. A cada MS que intente comunicar a la BS se le asignará un canal de comunicación dúplex básico con un número de identificador de conexión (CID) específico.
2. Los paquetes que poseen el mismo número de CID, pero parámetros de QoS diferentes se clasifican en Flujos de Servicio (SF). Puesto que puede haber más de un SF, a cada SF se le asigna un identificador de flujo de servicio (SFID). La clasificación de los paquetes en diferentes flujos de servicio se hace sobre la base de la región del Tipo de Servicio (ToS) de cada paquete IP particular. Esta clasificación se realiza en la subcapa MAC CS.
3. El ancho de banda requerido, o el mensaje de solicitud de ancho de banda, se envía entonces a la BS para asignar recursos de enlace ascendente para la MS emisora. La unidad de control de admisión (ACU) gestiona la tarea de concesión de ancho de banda. Esto se hace simplemente reduciendo el ancho de banda disponible total del sistema por el tamaño actual de petición de ancho de banda. Si el resultado de la operación es mayor o igual a cero, se concede el ancho de banda. De lo contrario, la MS es rechazada.
4. A continuación, la solicitud se coloca en 5 clases diferentes de colas a programar. Cada cola que representa un tipo de servicio de planificación. En otras palabras, los mensajes de solicitud de ancho de banda se clasifican de acuerdo con sus tipos de servicio de programación y, por lo tanto, los parámetros de calidad de servicio asociados.
5. El procedimiento de programación se determina mediante el algoritmo de programación incorporado.
6. Posteriormente, los paquetes programados se utilizan para construir el mensaje UL-MAP.
7. Un mensaje UL-MAP se transmite al comienzo de cada trama OFDMA a los MSs.

8. Todos los MSs escuchan el mensaje MAP difundido. Si un MS encontró su CID dirigido en el UL-MAP, entonces esto significa que MS puede ahora enviar su información en la ranura mencionada en el UL-MAP.

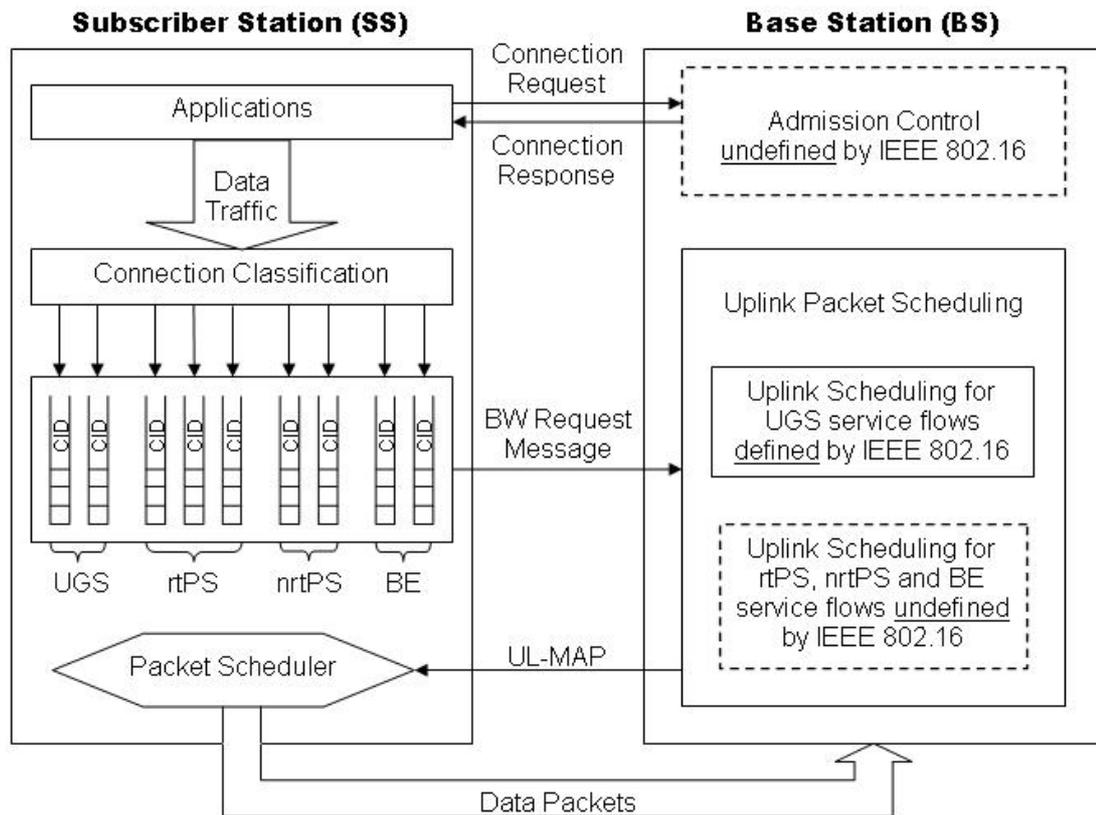


Figura 2. 11: Mecanismos de calidad de servicio de WiMAX.  
Fuente: (Wood, 2006)

## Capítulo 3: Simulación y Resultados Obtenidos.

### 3.1. Descripción del componente práctico a desarrollar.

En este capítulo describimos los bloques funcionales que componen el sistema de la capa física IEEE 802.16 (WiMAX) incluyendo las direcciones para enlaces ascendentes (*Upstream Link, UL*) como enlaces descendentes (*Download Link, DL*). Inicialmente, se va realizar la descripción del transmisor y se analizará cada uno de los elementos del transmisor y se analizarán los métodos a modelar en el software MatLab/Simulink. Posteriormente, se presentan los tipos de canales de ruido y se discutirá el método utilizado para implementar cada tipo de canal. Finalmente, se realiza algo similar con los elementos del receptor. La diferencia entre las etapas funcionales para los ULs y DLs radica en la asignación de subportadoras, de tal manera, que la sección de modelo de enlace descendente sólo los métodos de asignación de subportadora estarán presentes.

### 3.2. Diseño de la etapa del transmisor para la red WiMAX.

Esta sección describe los diferentes pasos que el transmisor realiza antes de transmitir los datos. Los bloques funcionales que componen el transmisor del simulador WiMAX se muestran en la figura 3.1.

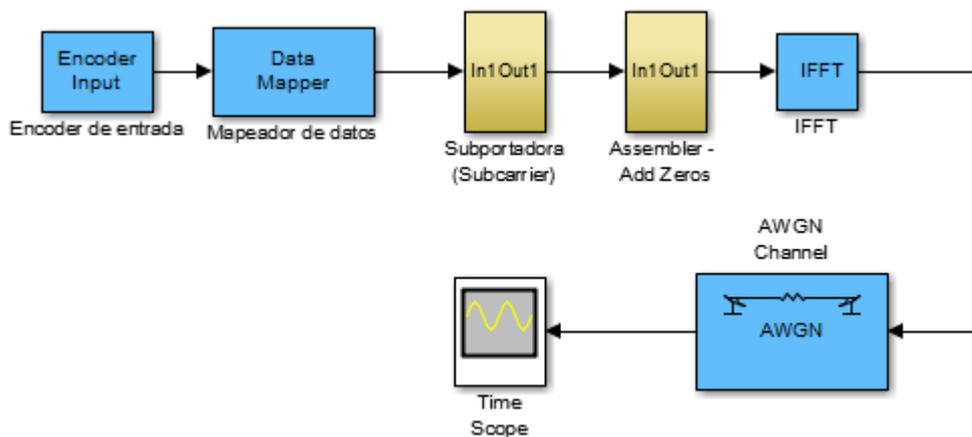


Figura 3. 1: Diagrama de bloques del transmisor de una WiMAX.  
Elaborado por: Autor.

Para el diseño del transmisor se utiliza fuentes de ráfagas (*Bursts*) y de modulación y codificación adaptativas (*Adaptive Modulation Coding, AMC*), estos dos son codificados mediante el codificador convolucional mapeado en símbolos, utilizando los esquemas de modulación QPSK o QAM. Luego los símbolos de cada usuario son asignados a un grupo de subportadoras llamadas subcanales. Cada usuario puede asignar un sub-canal o más.

El número de subportadoras en cada subcanal depende del método de asignación de subportadoras. Simulink es utilizado para la simulación de la parte de transmisión, este funciona para modelar la capa física (PHY) de una WiMAX que sería similar a una WMAN-OFDMA. Esta capa PHY utiliza el acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA*) utilizando el procesador FFT escalable.

A continuación, se describe el diagrama de bloques mostrado en la figura 3.1, dicho diseño, indica que los símbolos de OFDM están compuesto de las siguientes subportadoras: 96 de datos, 1 DC cero, 10 piloto; y 22 portadoras de guardia. Posterior a esto, se utiliza el diagrama de bloques (Assembler) para integrar las subportadoras DC cero, de datos y piloto para la generación de símbolos. Además, los preámbulos que consisten en secuencias de entrenamiento se añaden al comienzo de cada ráfaga.

Dichas secuencias son utilizadas para estimar los coeficientes del canal en el receptor (Rx) y después de este proceso, se realiza una adición de ceros. La señal es convertida en el dominio del tiempo a través del bloque IFFT (inversa de la transformada rápida de Fourier), y finalmente, se incluye un prefijo cíclico (*Cyclic Prefix, CP*), este sirve para evitar la interferencia entre símbolos.

### **3.3. Configuración del canal inalámbrico para la red WiMAX.**

Esta parte del canal es la que nos permite simular la comunicación entre el transmisor y receptor como si fuese en tiempo real. El canal que se escoja definirá las características de atenuación. Es decir, que la evaluación de la simulación depende fuertemente del canal de radio, para lo cual es necesario utilizar modelos de canal precisos y realistas en la simulación que permitan obtener resultados realistas y confiables.

Para la simulación del enlace inalámbrico WiMAX, es necesario incluir canales de radio inalámbricos. Las señales recibidas no pueden ser simulada simplemente como una copia de la señal transmitida corrompida por ruido gaussiano aditivo (*Additive Gaussian Noise, AGN*) o por ruido blanco gaussiano aditivo (*Additive White Gaussian Noise, AWGN*). En vez de incluir AGN o AWGN se utiliza un canal de desvanecimiento de la señal, aunque las características que varían en el tiempo del entorno de propagación. De esta manera, las fluctuaciones a corto plazo causadas por la dispersión de señales de objetos en el entorno de propagación conducen a un fenómeno conocido como propagación por trayectos múltiples.

La dispersión de tiempo en un entorno multitrayecto hace que la señal experimente un desvanecimiento plano o selectivo en frecuencia. La dispersión del tiempo se manifiesta por el tiempo de propagación en el tiempo de los símbolos modulados que conducen a interferencia entre símbolos (*Inter Symbol Interference, ISI*). Para eliminar la ISI en sistemas OFDM, se debe elegir el tiempo del CP y a la vez que sea mayor que la propagación máxima de retardo del canal.

### **3.4. Diseño de la etapa del receptor para la red WiMAX.**

En la figura 3.2 se muestra el diseño del receptor de la red WiMAX. Básicamente realiza el funcionamiento inverso del que se describió en la etapa del transmisor. Estos procesos incluyen los siguientes diagramas de

bloques: remover CP, transformada rápida de Fourier, remover ceros, y demás bloques similar al transmisor. Esta sección explica los diferentes pasos realizados por el receptor para reconstruir los bits transmitidos. En primer lugar, la trama OFDMA se demultiplexa y se extrae el marco OFDM de cada usuario.

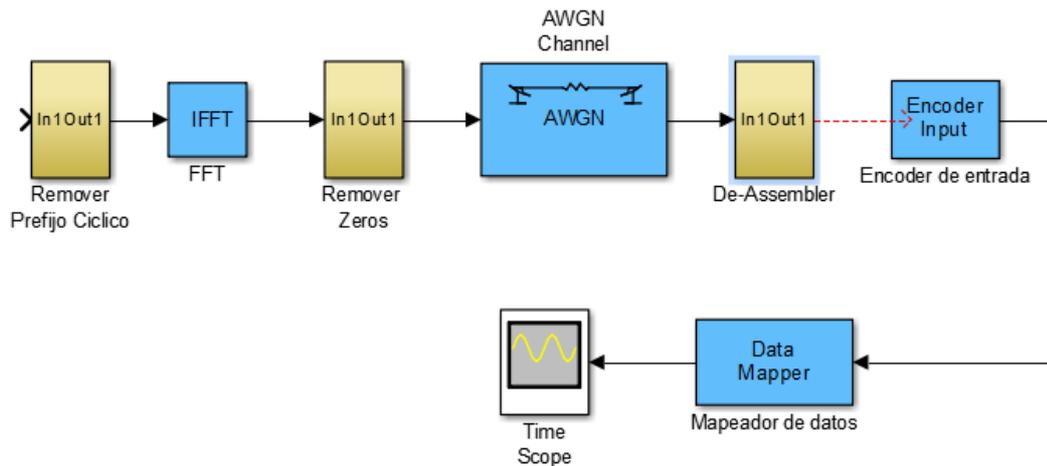


Figura 3. 2: Diagrama de bloques del receptor de una WiMAX.  
Elaborado por: Autor.

### 3.5. Evaluación de rendimiento de la capa física IEEE 802.16.

En esta sección se evalúa el rendimiento de simulación de la capa física IEEE 802.16 WiMAX, así como obtener una comprensión más precisa del funcionamiento del sistema. Se utilizan diferentes variantes o parámetros durante la ejecución del diseño del sistema, logrando realizar diferentes comparaciones entre los esquemas de modulación digital. También, en el análisis se incluyen los impactos de los diferentes canales utilizados en la simulación. Los canales utilizados son: AWGN, desvanecimiento multitrayectoria con desvanecimiento plano y dispersivo.

#### 3.5.1. Parámetros de atenuación en canales utilizados en la simulación.

El diagrama de bloques del canal inalámbrico de trayectos múltiples (véanse las figuras 3.1 y 3.2) utiliza diferentes modos de atenuación, y para la evaluación del sistema se utilizó tres modos de atenuación, que son:

- Canal sin atenuación: en este tipo no hay efecto de atenuación aplicado por el canal a la trama OFDMA transmitida. Pero, si hay presencia de ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN).
- Canal de desvanecimiento plano: esta configuración trabaja conjuntamente con AWGN, en la cual el canal multitrayecto tiene un efecto de atenuación aplicado a la trama OFDMA transmitida. El efecto de desvanecimiento se distribuye a lo largo de toda la trama OFDMA, lo que significa que la trama completa tiene igual atenuación.
- Canal de desvanecimiento dispersivo: similar a la anterior configuración con AWGN, donde el canal multitrayecto tiene un efecto de desvanecimiento aplicado a la trama OFDMA transmitida. El efecto de desvanecimiento se distribuye de forma dispersiva a lo largo de la trama OFDMA, en otras palabras, en algún instante de tiempo la trama OFDMA puede tener desvanecimientos en algunas frecuencias y las otras frecuencias permanecen sin cambios.

### **3.5.2. El efecto del canal sobre la constelación.**

El bloque del canal se puede modificar tanto en amplitud como la fase de la señal transmitida, es decir, que afecta la constelación de la señal transmitida de acuerdo al tipo de canal que a su vez conduce a un error al demapeo de la señal en el receptor. En las figuras 3.3, 3.4 y 3.5 se muestran los efectos del canal sin atenuación utilizando AWGN, que tiene los siguientes parámetros: relación señal / ruido (*Signal to Noise Ratio, SNR*) fijada en 30dB y desplazamiento Doppler fijada en 200Hz. Se utiliza diferentes constelaciones de la modulación QPSK, 16-QAM y 64-QAM. Es fácil distinguir que los puntos son dispersados alrededor de los puntos de constelación originales, es decir, de 4, 16 & 64.

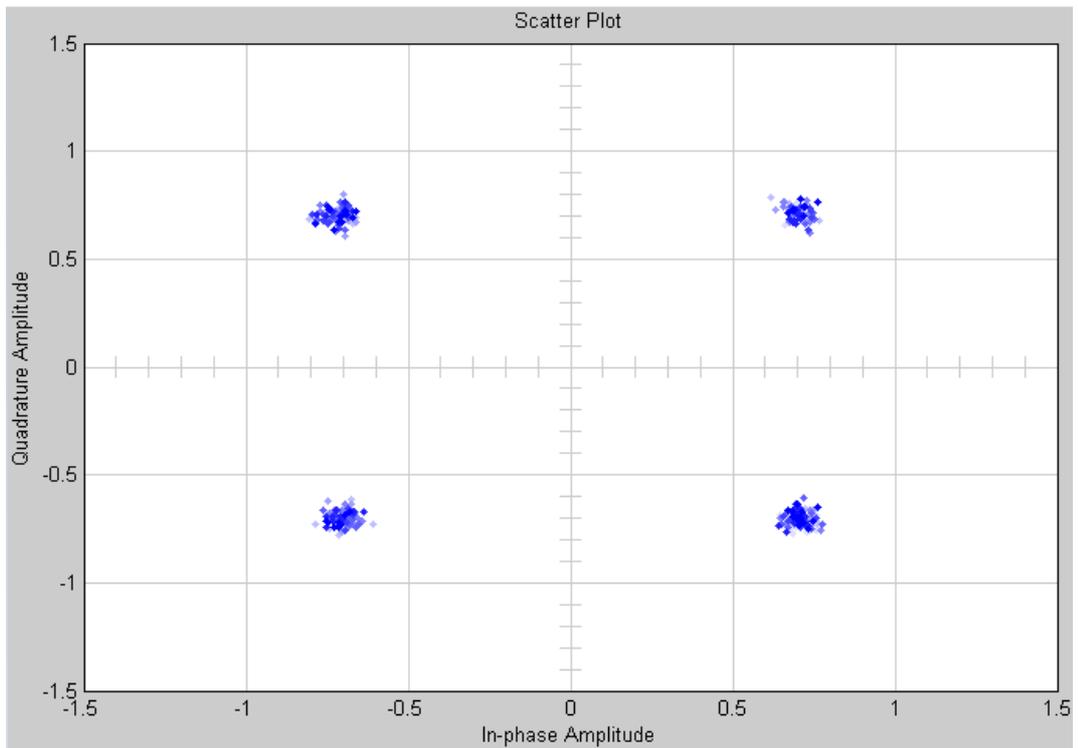


Figura 3. 3: Resultado de constelación QPSK después del canal AWGN.  
Elaborado por: Autor.

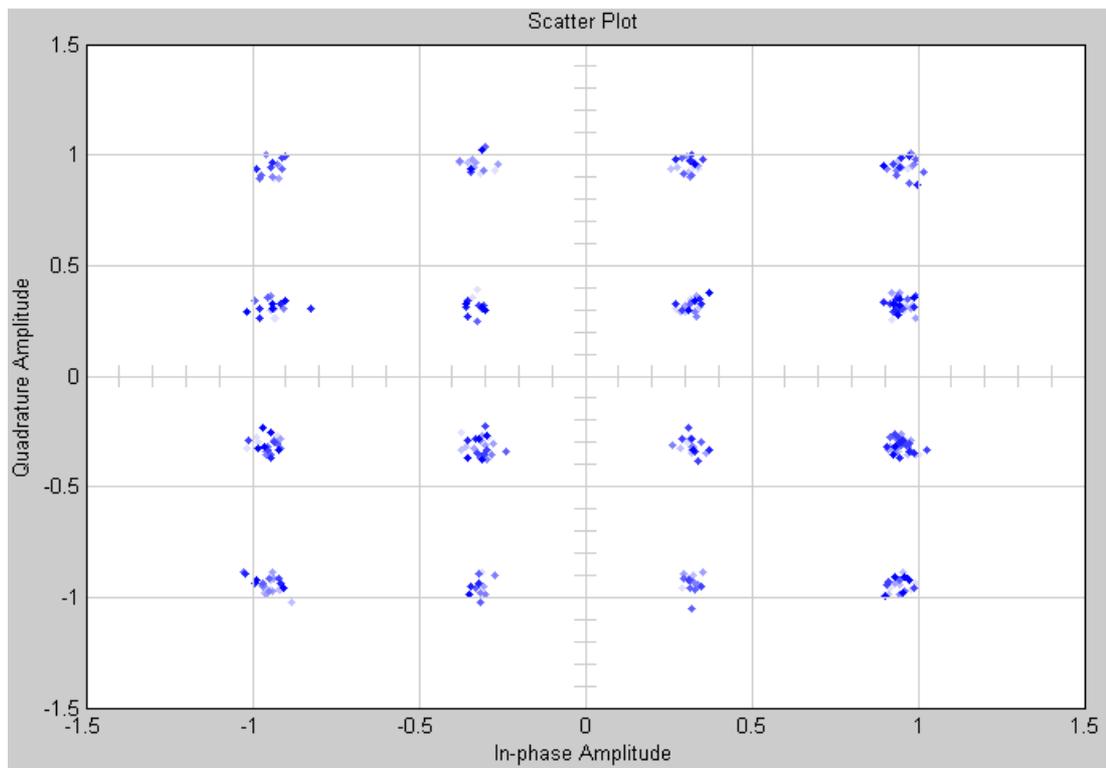


Figura 3. 4: Resultado de constelación 16 QAM después del canal AWGN.  
Elaborado por: Autor.

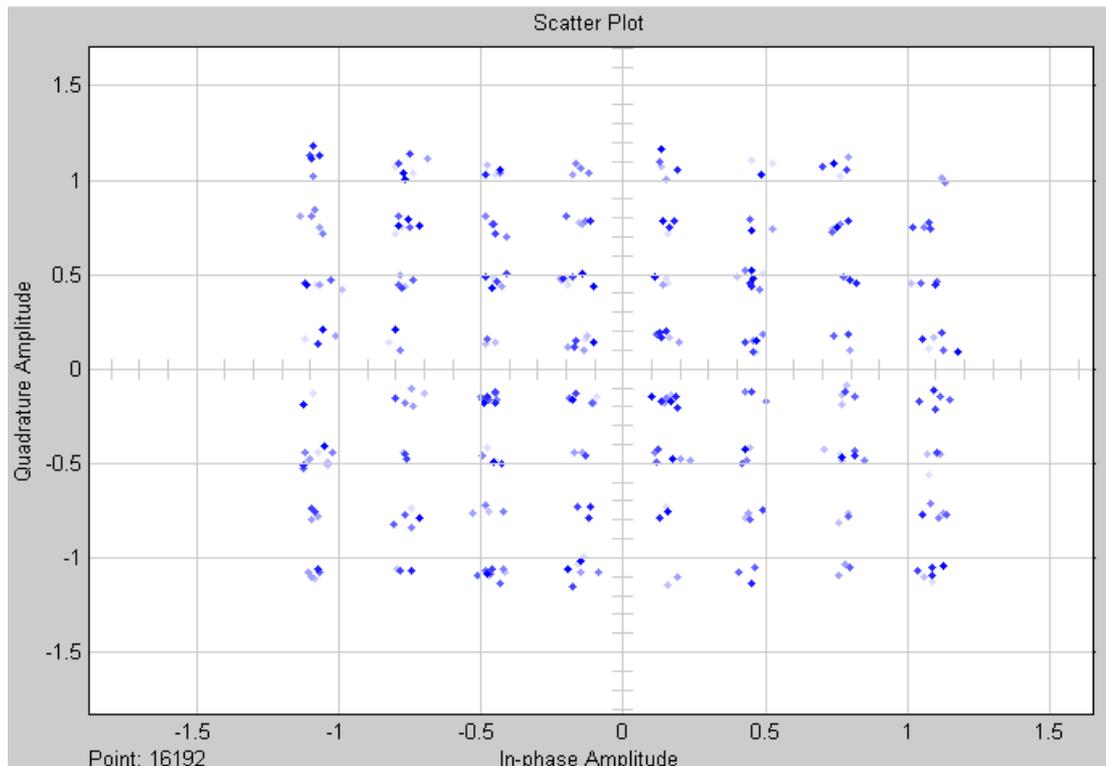


Figura 3. 5: Resultado de constelación 64 QAM después del canal AWGN.  
Elaborado por: Autor.

Este diagrama de constelación (véase figura 3.4) para desvanecimiento dispersivo de es el idéntico para el esquema de modulación QPSK cuya tasa es  $1/2$ , y QPSK con tasa  $3/4$ . Mientras que el diagrama de constelación (véase la figura 3.5) tiene el mismo desvanecimiento de dispersión para esquemas de modulación de 16 QAM con tasa  $1/2$  y de  $3/4$ . Para el caso de los resultados obtenidos de AWGN sin canal de desvanecimiento, se puede observar ver que los puntos de constelación son casi los mismos que los transmitidos. Sin embargo, el resultado no es el esperado para tener una constelación perfecta. Esto, debido al ruido añadido por el canal que se puede evitar mediante el aumento de la relación S/N.

El siguiente caso ocurre si el canal es multitrayecto con desvanecimiento plano, en el cual los puntos de la constelación son desplazados por un ángulo debido a los cambios de fase. Cuando el simulador está funcionando podemos observar que la amplitud también se cambia para los puntos de constelación.

n la figura 3.6 se muestra el efecto del canal de desvanecimiento plano para la modulación 16 QAM, y antes llegar al ecualizador de frecuencia con los siguientes parámetros: atenuación debida a la relación S/NR en 30dB y el desplazamiento Doppler de 200Hz.

La figura 3.6 también muestra el efecto del canal de desvanecimiento plano para modulación 16 QAM antes del proceso de ecualización. Este efecto aparece como una rotación de fase, cada punto de constelación (cantidad de la rotación de fase es igual para todos los puntos de constelación debido al desvanecimiento plano). También podemos ver que la constelación de dispersión es afectada por la cantidad de ruido, el modo del desvanecimiento y la cantidad de frecuencia desplazamiento Doppler. Las estimaciones de canales en la extracción de las ganancias son utilizadas para la ecualización de frecuencia y recuperación de la señal transmitida. La figura 3.7 muestra la constelación de la señal recibida del esquema de modulación 16 QAM (véase la figura 3.6) después del ecualizador.

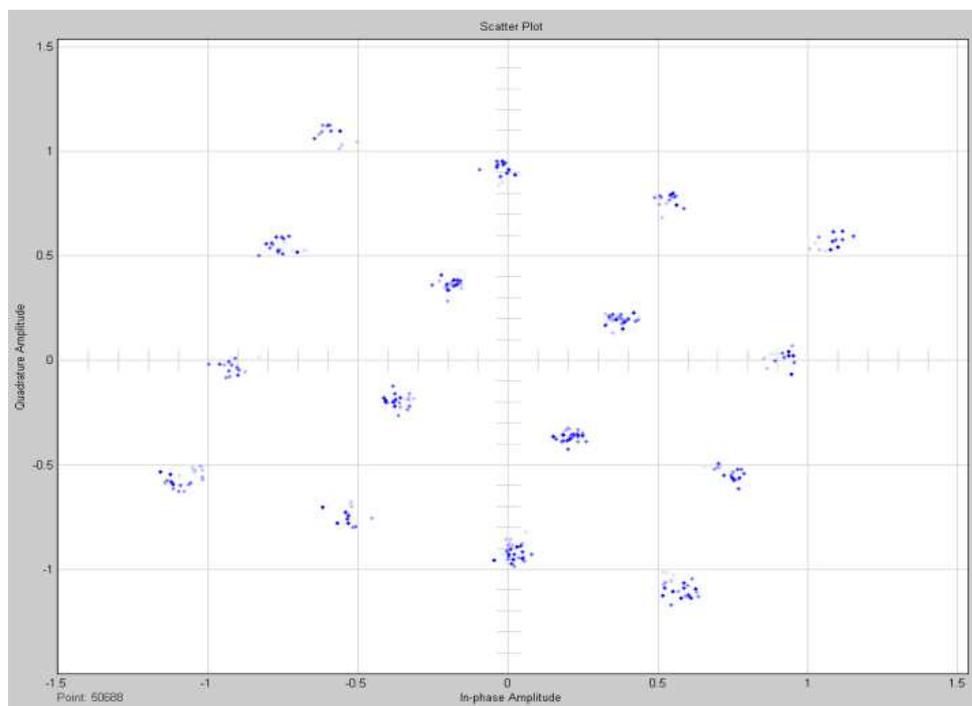


Figura 3. 6: Resultado de constelación del canal multitrayecto de desvanecimiento plano para esquema de modulación 16 QAM.

Elaborado por: Autor.

El efecto de rotación de puntos fue eliminado a través del sistema de ecualización, aunque hay todavía presencia de ruido. Esto se puede solucionar con tal solo incrementar la relación S/N. Tanto el desvanecimiento plano como el dispersivo cambian en amplitud y la fase de la señal transmitida. Es decir, que los puntos de constelación se dispersan en forma circular, porque el desplazamiento de fase es dispersivo entre  $360^\circ$  y cuando el sistema está en funcionamiento, observamos como la magnitud cambia con el tiempo, ya sean incrementando o disminuyéndose.

En la figura 3.8 se muestra la constelación de 16 QAM después del canal multitrayecto con desvanecimiento dispersivo, con relación S/N= 30 dB y desplazamiento Doppler = 200Hz, antes del ecualizador.

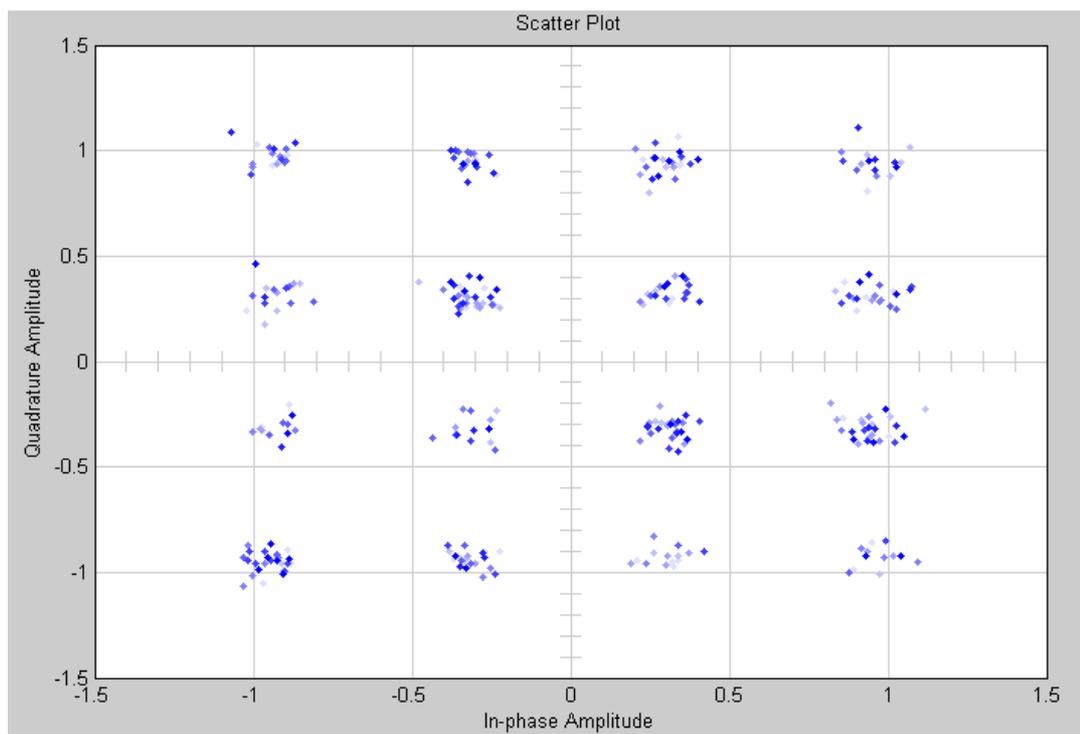


Figura 3. 7: Resultado de constelación 16 QAM después de la ecualización.  
Elaborado por: Autor.

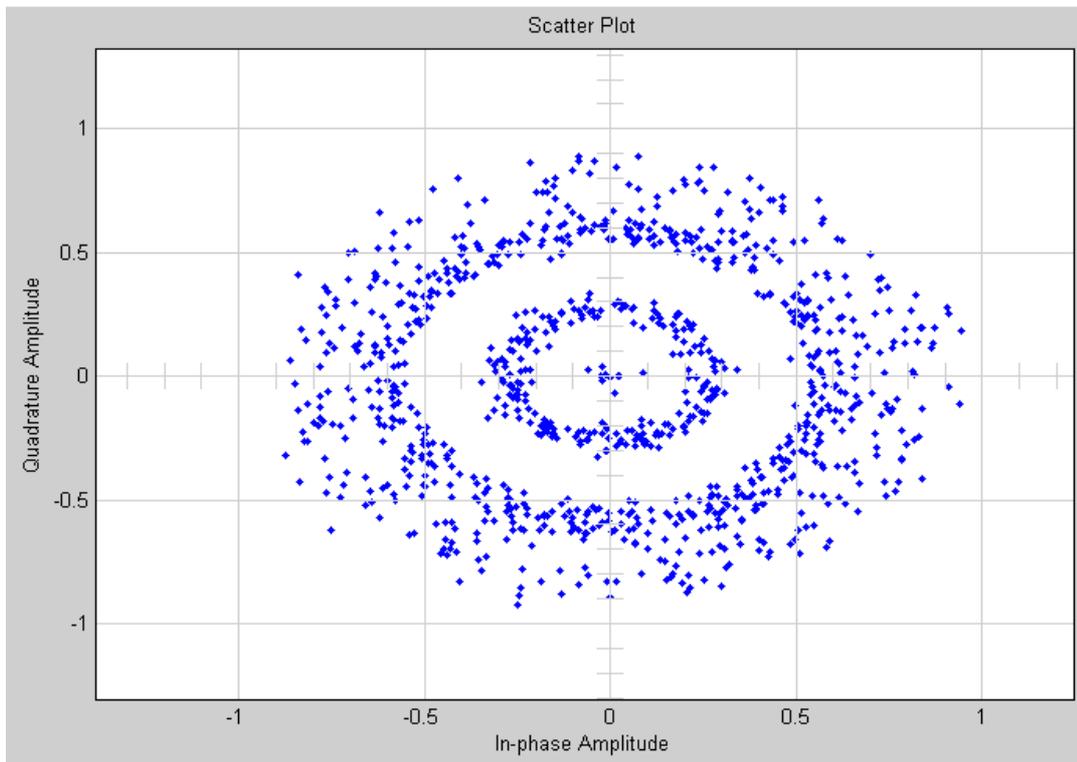


Figura 3. 8: Resultado del efecto para canal de desvanecimiento dispersivo en la constelación 16 QAM.  
Elaborado por: Autor.

En la figura 3.8 se muestra el efecto del canal de desvanecimiento dispersivo con modulación 16 QAM antes del proceso de ecualización. Es evidente, que los desplazamientos de fase se distribuyen entre los 360 grados y la magnitud se distribuye a dos grupos cada grupo tiene una magnitud común.

En la figura 3.9 .se muestra la misma constelación de 16 QAM después del proceso de ecualización para el canal dispersivo de desvanecimiento. Después del proceso de ecualización se mejora notablemente los puntos de constelación, pero aún persiste una pequeña cantidad de ruido a cada punto. En comparación con la constelación después del ecualizador en caso de desvanecimiento plano podemos decir que el canal dispersivo de desvanecimiento logra afectar el cambió en la constelación más que el canal de desvanecimiento plano.

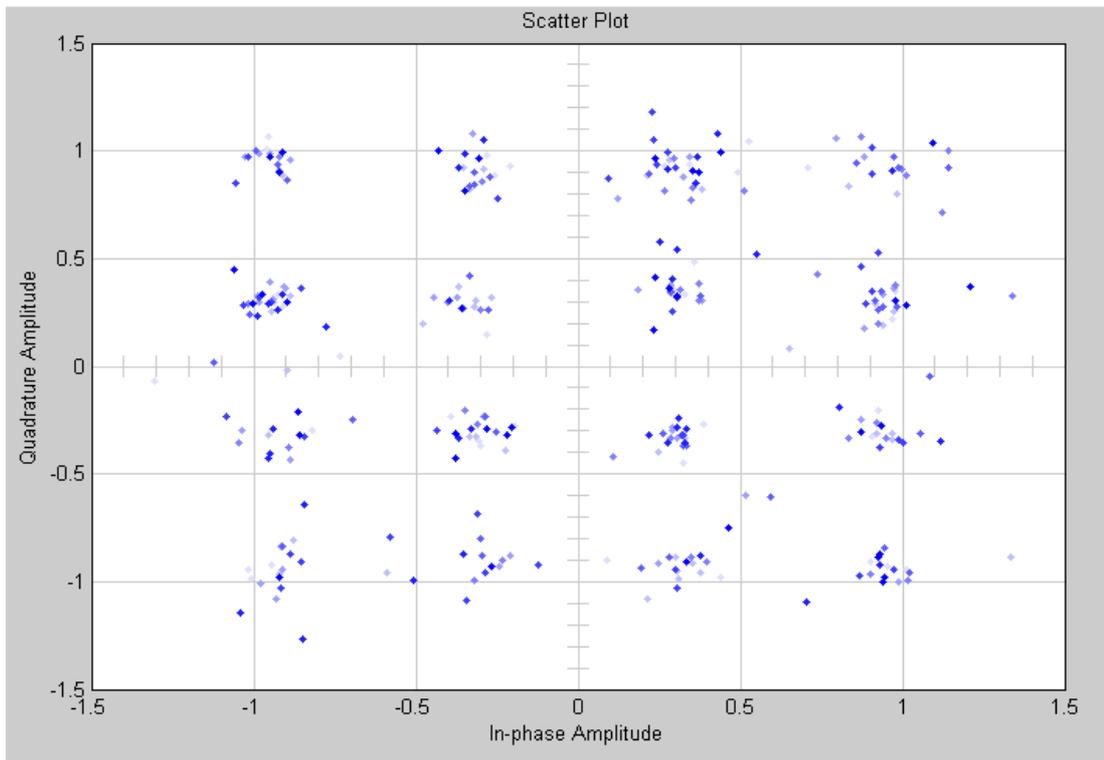


Figura 3. 9: Resultado del ecualizador para canal de desvanecimiento dispersivo en la constelación 16 QAM.  
Elaborado por: El Autor

### 3.6. Resultados del espectro del sistema WiMAX.

Para la ejecución de la simulación de WiMAX se escoge  $BW = 1,25$  MHz (*BandWidth, BW*) compuesto por FFT de tamaño 128 y espaciamiento de subportadora obligatorio de 10,94 KHz, que es el parámetro básico para todos los canales OFDMA escalables. La duración del símbolo OFDMA en el dominio del tiempo es 114,26 us. Este valor es constante para todos los tamaños de canales (con FFT) y la duración de protección (con prefijo cíclico  $\frac{1}{4}$ ). A continuación, se muestran los demás parámetros de simulación (anteriormente se dieron tres valores) para OFDMA:

- Tiempo útil de símbolo:  $T_b = \frac{1}{f} = 91,41$  us
- Tiempo de guarda:  $T_g = \frac{T_b}{4} = 22,85$  us
- Duración del símbolo OFDMA:  $T_s = T_b + T_g = 114,26$  us

En la figura 3.10 se muestra el símbolo OFDM en el dominio del tiempo con una duración de 114,26 us, mientras que la figura 3.11 muestra el cero insertado como una banda de guarda desplazada hacia el centro del símbolo OFDMA.

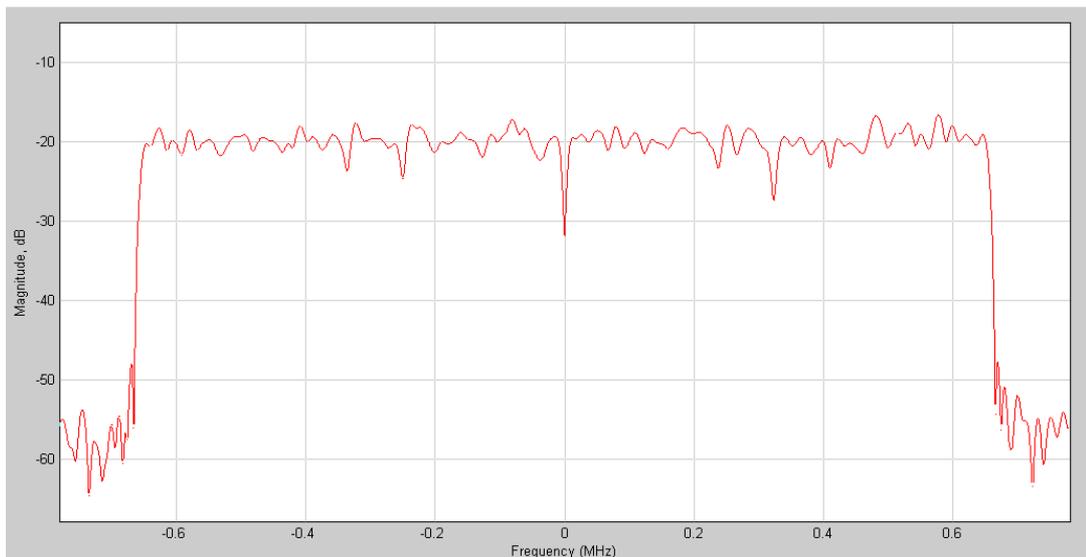


Figura 3. 10: Resultado de la variación de SMs en el escenario 5.  
Elaborado por: El Autor

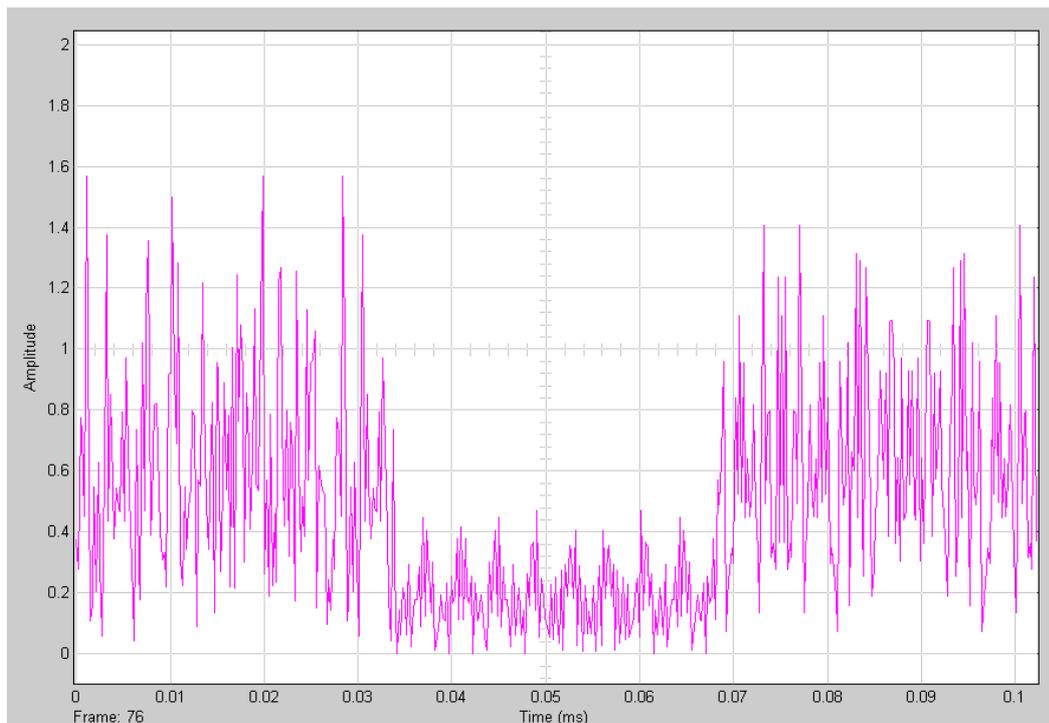


Figura 3. 11: Resultado del símbolo OFDM.  
Elaborado por: El Autor

Los datos de todos los usuarios combinados después del proceso la inversa FFT (IFFT) para componer el símbolo de tiempo OFDMA tal como se muestra en la figura 3.12, y se puede observar que la amplitud media del símbolo OFDMA es menor que OFDM que minimiza la influencia del problema de potencia máxima media antes expuesto en los sistemas OFDMA en general. La duración de la trama OFDMA debe ser la suma de las duraciones de todas las fuentes. También, se puede ver que la trama OFDMA ha sido ajustado a la duración de una fuente típicamente.

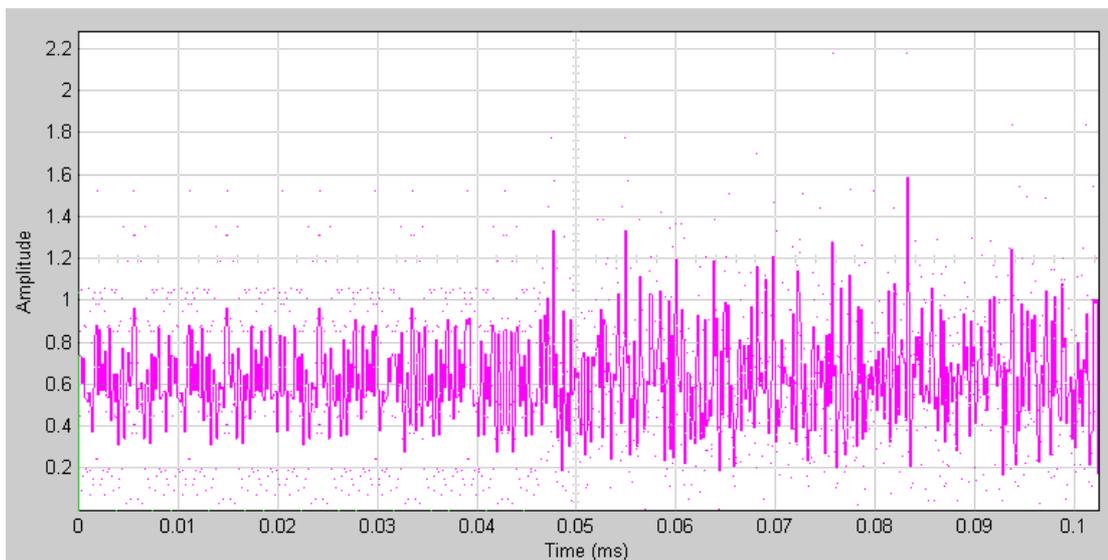


Figura 3. 12: Resultado del símbolo OFDMA.  
Elaborado por: El Autor

## Conclusiones

1. Las industrias de comunicaciones inalámbricas siguen creciendo rápidamente tanto en aplicaciones fijas como móviles. La demanda de mejora de los servicios integrados (voz, datos y multimedia) está aumentando la necesidad de mayores capacidades y velocidades de transmisión de datos no sólo en aplicaciones fijas sino también en aplicaciones móviles.
2. El diseño de simulación de la capa física de WiMAX se implementó en MatLab Simulink, en el cual se incluyeron diferentes de canales de ruido y desvanecimientos planos y dispersivos utilizando algunos esquemas de modulación digital.
3. Los resultados obtenidos en la simulación de WiMAX cuando el canal de transmisión utilizado es de 1,25 MHz implica que el canal tiene un efecto intenso sobre el rendimiento del sistema, especialmente el canal multitrayecto con desvanecimiento plano o dispersivo que restringe el rendimiento del sistema; Usando la técnica de estimación de canal apropiada.

## **Recomendaciones**

1. Evaluación comparativa de la tasa de error de bits en redes WiMAX OFDMA mediante modulaciones QPSK y QAM usando Opnet.
2. Evaluación comparativa entre OFDM y OFDM mediante esquemas de modulación digital usando MatLab/Simulink.

## Bibliografía

- Abad Camarero, D. (2014). *Performance analysis of IPv4/IPv6 protocols over the third generation mobile network* (Tesis de Maestría). Recuperado a partir de <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:781669/FULLTEXT01.pdf>
- Andrews, J. G., Ghosh, A., & Muhamed, R. (2007). The nuts and bolts of WiMAX. Recuperado el 10 de febrero de 2017, a partir de [http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1275061](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1275061)
- Asanza Q., A., & Cisneros P., E. (2010). *Evaluación de tendencia tecnologica actual tanto en redes como en protocolos* (Tesis de Grado). ESPOL. Recuperado a partir de <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/10385>
- Beer, W. (2004). *Supporting Context Awareness in Highly Dynamic Network Environments*. Recuperado a partir de <http://www.smartlab.at/proceedings/>
- Dube, R. R., & Dhanashetti, A. (2013). Analysis Of Wimax Connectivity In Rural And Urban Area Using Propagation Model (Vol. Vol.2-Issue 4 (April-2013)). Presentado en International Journal of Engineering Research and Technology, IJERT. Recuperado a partir de <http://www.ijert.org/view-pdf/3280/analysis-of-wimax-connectivity-in-rural-and-urban-area-using-propagation-model>

- Jakimoski, K., & Janevski, T. (2013). Improvement of the QoS for WiMAX Service Classes. *Technology Education Management Informatics*, 2(2), 107–114.
- Kahn, K. (2005). Evolution of WiMAX: Beyond Fixed Access Networks [Broadband Working Group (BBWG)]. Recuperado el 9 de febrero de 2017, a partir de [http://cfp.mit.edu/events/jan05/presentations/Kahn\\_WiMax.pdf](http://cfp.mit.edu/events/jan05/presentations/Kahn_WiMax.pdf)
- Li, B., Qin, Y., Low, C., & Gwee, C. (2007). A Survey on Mobile WiMAX [Wireless Broadband Access]. *IEEE Communications Magazine*, 45(12), 70–75. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2007.4395368>
- Miao, G., Himayat, N., Li, G. Y., & Talwar, S. (2012). Low-Complexity Energy-Efficient Scheduling for Uplink OFDMA. *IEEE Transactions on Communications*, 60(1), 112–120.
- Mohamed, M. A., Zaki, F. W., & Mosbeh, R. H. (2010). Simulation of WiMAX Physical Layer IEEE 802.16e. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 10(11). Recuperado a partir de [http://paper.ijcsns.org/07\\_book/201011/20101109.pdf](http://paper.ijcsns.org/07_book/201011/20101109.pdf)
- Multimedia Streaming Protocols. (2010). Recuperado el 10 de marzo de 2017, a partir de <http://iprinceps.blogspot.com/2010/07/multimedia-streaming-protocols-real.html>
- Nisar, K., Hijazi, M. H. A., & Lawal, I. A. (2015). A new model of application response time for VoIP over WLAN and fixed WiMAX (pp. 174–179). Presentado en International Conference on Computing Technology and

Information Management (ICCTIM), IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/ICCTIM.2015.7224613>

Patiño, D. (2011, febrero 20). REDES: Modelo OSI / IEEE 802 / TCP/IP. Recuperado el 8 de febrero de 2017, a partir de <http://dario8918.blogspot.com/2011/02/modelo-osi-ieee-802-tcpip.html>

Putra, D. R., Kai-Wei Ke, & Ho-Ting Wu. (2009). Self-similar traffic assessment on QoS service classes of WiMAX network (pp. 1–6). IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/WIOPT.2009.5291576>

Royal, F. (2017). Mobile WiMAX Network Architecture. Recuperado el 9 de febrero de 2017, a partir de <http://frankroyal.com/wp-content/uploads/2017/02/Mobile-WiMAX-Network-Architecture.pdf>

Santhoshkumar, S., & Ponmuthuramalingam, P. (2015). A Message Transmission on WiMAX Techniques. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 19(6), 296–300.

Selvarani, D. R., & Ravi, T. N. (2014). Comparative analysis of Wi-Fi and WiMAX (pp. 1–7). Presentado en International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES), IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/ICICES.2014.7033799>

Singh, K., Singh, M., & Malhotra, S. (2014). A Survey on QoS classes and encoding schemes over WiMAX. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, 3(5), 488–494.

Sripol, B. (2008). Know the WiMAX depth at first air-interface [Article]. Recuperado el 10 de febrero de 2017, a partir de <http://www.mvt.co.th/viewarticle.php?cid=3&nid=107&page=4>

- Talledo Aguilar, N. (2012). *Diseño de una red Wimax para dotar del servicio de telefonía fija al sitio Galayacu, provincia de El Oro*. (Trabajos de grado). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Recuperado a partir de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/2199>
- Vanet. (2017). EvalVid Wireless. Recuperado el 8 de febrero de 2017, a partir de <http://networksimulator2.com/evalvid/evalvid-wireless-video-transmission/>
- Wang, M. (2011). WiMAX physical layer: Specifications overview and performance evaluation (pp. 10–12). Presentado en Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), IEEE. <https://doi.org/10.1109/CCNC.2011.5766338>
- Wood, M. C. (2006). An Analysis of the Design and Implementation of QoS over IEEE 802.16. Recuperado el 10 de marzo de 2017, a partir de [http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-06/ftp/wimax\\_qos/](http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-06/ftp/wimax_qos/)

## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Monserrate Coello, Ricardo José** con C.C: # 091941290-8 autor del trabajo de titulación: Rendimiento de la capa física del estándar IEEE 802.16 usando diferentes esquemas de modulación, previo a la obtención del título de **Magister en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 30 de junio de 2017

f. \_\_\_\_\_

Nombre: **Monserrate Coello, Ricardo José**

C.C: 091941290-8

<b>REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA</b>			
<b>FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN</b>			
<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Rendimiento de la capa física del estándar IEEE 802.16 usando diferentes esquemas de modulación		
<b>AUTOR(ES)</b>	Monserrate Coello, Ricardo José		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	MSc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio; MSc. Ruilova Aguirre, María Luzmila / MSc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Sistema de Posgrado		
<b>PROGRAMA:</b>	Maestría en Telecomunicaciones		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Magister en Telecomunicaciones		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	30 de junio de 2017	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	63
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Comunicaciones Inalámbricas		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Canales, AWGN, Desvanecimiento, Dispersivo, Capas, WiMAX		
<b>RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):</b>			
<p>Después de los sistemas de comunicaciones ópticos, las comunicaciones inalámbricas siguen funcionando y evolucionando ya sean para redes fijas (WLAN) o móviles (WiMAX y telefonía celular). Ambos sistemas de comunicaciones trabajan en forma conjunta, la una siempre depende de la otra. Se realizó una búsqueda bibliográfica de los estándares de comunicaciones inalámbricas en especial de WiMAX y compara las capas de IEEE 802 con el modelo OSI. Dentro de WiMAX se describe la capa física y la calidad de servicio (QoS). El trabajo de titulación consiste en modelar una red WiMAX para evaluar el rendimiento a nivel de la capa física que opera con la multiplexación por división de frecuencias ortogonales empleando diferentes esquemas de modulación digital. Se utilizaron tres canales, AWGN, desvanecimiento plano y dispersivo entre la etapa de transmisión y recepción. Los resultados obtenidos durante la ejecución de la simulación demostraron como se eliminaba el ruido utilizando los esquemas de modulación.</p>			
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> 0991573128	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:ricardojose_1@hotmail.com">ricardojose_1@hotmail.com</a>	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):</b>	<b>Nombre:</b> Manuel Romero Paz		
	<b>Teléfono:</b> 0994606932		
	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:mrromeropaz@yahoo.com">mrromeropaz@yahoo.com</a>		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			