



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Análisis comparativo de la capacidad y cobertura en redes WiMAX y 4G
utilizando esquemas de modulación y codificación**

AUTOR:

Mora Pallo, Fredy Antonio

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

TUTOR:

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

01 de Junio del 2018



**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 **Mora Pallo, Fredy Antonio** como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de **MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DEL PROGRAMA

M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, 01 de junio del 2018



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Mora Pallo, Fredy Antonio**

DECLARÓ QUE:

La tesis **“Análisis comparativo de la capacidad y cobertura en redes WiMAX y 4G utilizando esquemas de modulación y codificación”**, 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 responsabilizó del contenido, veracidad y alcance científico de la tesis del Grado Académico en mención.

Guayaquil, 01 de junio del 2018

EL AUTOR

Mora Pallo, Fredy Antonio



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, **Mora Pallo, Fredy Antonio**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución de la Tesis de Maestría titulada: **“Análisis comparativo de la capacidad y cobertura en redes WiMAX y 4G utilizando esquemas de modulación y codificación”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 01 de junio del 2018

EL AUTOR

Mora Pallo, Fredy Antonio

REPORTE DE URKUND

URKUND

Documento [Freddy Mora Final.docx](#) (D35310441)

Presentado 2018-02-04 21:20 (-05:00)

Presentado por fernandopm23@hotmail.com

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

Mensaje Segunda revisión Fredy Mora [Mostrar el mensaje completo](#)

1% de estas 30 páginas, se componen de texto presente en 1 fuentes.

Lista de fuentes	Bloques		
+	Categoría	Enlace/nombre de archivo	▣
+		Proyecto Luis Burgos UCSG.docx	<input type="checkbox"/>
+		TESIS - ING.NESTOR TALLEDO A LIGH...	<input checked="" type="checkbox"/>
+		http://repositorio.ucsg.edu.ec/handl...	<input type="checkbox"/>
+		http://repositorio.ucsg.edu.ec/handl...	<input type="checkbox"/>
+		http://repositorio.ucsg.edu.ec/handl...	<input type="checkbox"/>

Reiniciar Exportar Compartir

1 Advertencias.

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

TEMA: Análisis comparativo de la capacidad y
cobertura en redes WiMAX y 4G utilizando esquemas
de modulación y codificación

AUTOR: Mora Pallo, Fredy Antonio

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

TUTOR: Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

02 de Febrero del 2018

Dedicatoria

Gracias Papito Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor. Por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

Este trabajo de titulación es un logro más que llevo a cabo, y sin lugar a dudas ha sido en gran parte gracias a ustedes; Mamita Piedad Pallo Ortega, eres una mujer que simplemente me hace llenar de orgullo, te amo y no va haber manera de devolverte tanto que me has ofrecido. No sé en donde me encontraría de no ser por tu ayuda, tu compañía, y tu amor. Papi Fredy Mora Jaime han pasado muchos años desde que nací, desde ese momento e incluso antes que eso, ya estabas buscando maneras de ofrecerme lo mejor. La ayuda que me has brindado ha formado bases de gran importancia en mi vida. Gracias por esto y mucho más mis amados padres.

Tu apoyo fue fundamental, estuviste a mi lado incluso en los momentos más turbulentos. Este logro no fue fácil, pero me motivabas cuando me sentía desanimado y me ayudabas hasta más allá de donde te permitían tus alcances. Te lo agradezco muchísimo mi amada esposa Jennifer Moreira Andrade.

Hermanos, amigos, no podría sentirme más ameno con la confianza puesta sobre mi persona, especialmente cuando he contado con su mejor apoyo desde que tengo memoria. Este nuevo logro es en gran parte gracias a ustedes; he logrado concluir con éxito un proyecto que en un principio podría parecer tarea titánica e interminable. Quisiera dedicar mi tesis a ustedes, personas de bien, seres que ofrecen amor, bienestar.

A mi tutor de titulación, M. Sc. Fernando Palacios Meléndez, por su generosidad al brindarme la oportunidad de recurrir a su capacidad y experiencia científica en un marco de confianza, afecto y amistad, fundamentales para la concreción de este trabajo.

Agradecimientos

A mis padres por su entrega abnegada y sublime siendo pilares fundamentales para culminar esta maestría, a mi esposa, hermanos y amigos por su apoyo incondicional ayudándome con sus experiencias y consejos para así cumplir mis metas, convirtiéndome en un profesional de éxito y mejor persona.

A mi amigo, que como Tutor de Titulación me supo ayudar a realizar un trabajo digno y de mucho provecho para las siguientes promociones de profesionales que se inclinen a realizar la Maestría de Telecomunicaciones.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

M. Sc. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO
TUTOR

f. _____

M. Sc. CÓRDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO
REVISOR

f. _____

M. Sc. ZAMORA CEDEÑO, NESTOR ARMANDO
REVISOR

f. _____

M. Sc. ROMERO PAZ, MANUEL DE JESÚS
DIRECTOR DEL PROGRAMA

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIV
Resumen	XV
Abstract.....	XVI
Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.....	XV
1.1. Introducción.....	17
1.2. Antecedentes.....	19
1.3. Definición del problema	22
1.4. Objetivos.....	23
1.5. Hipótesis.....	23
1.6. Metodología de investigación.....	23
Capítulo 2: Fundamentos de redes WiMAX y LTE.....	26
2.1. Definiciones básicas de WiMAX.....	26
2.2. Estándares de WiMAX.....	28
2.3. Asignación del espectro radioeléctrico.....	31
2.3.1. Bandas licenciadas de frecuencias para 2.5 GHz.....	32
2.3.2. Bandas licenciadas de frecuencias para 2.3 GHz.....	32
2.3.3. Bandas licenciadas de frecuencias para 3.5 GHz.....	32
2.3.4. Bandas exentas de licencia de frecuencias para 5 GHz.....	33
2.3.5. Bandas de ultra alta frecuencia – UHF.....	33
2.3.6. Banda de servicios inalámbricos avanzados - AWS.....	34
2.4. Arquitectura de la red WiMAX.....	35
2.4.1. Estación base (BS).....	36
2.4.2. Puerta de enlace de la red de accesos al servicio (ASN-GW).....	36
2.4.3. Red de servicios de conectividad (CSN).....	37
2.5. Funcionamiento de una red WiMAX.....	39
2.6. Seguridad en redes WiMAX.....	41

2.7.	Arquitectura de red LTE.....	43
2.8.	Interfaz de radio.....	46
2.9.	Escalabilidad del ancho de banda en LTE.....	52
2.10.	Capacidad y cobertura.....	52
Capítulo 3: Análisis Comparativo entre WiMAX y LTE.....		55
3.1.	Introducción del análisis comparativo.....	55
3.2.	Diseño del escenario de simulación del nivel de enlace de SC-FDE.	55
3.3.	Evaluación de la tasa de error de símbolos para SC-FDE y OFDM utilizando el esquema de ecualización MMSE.	58
3.4.	Evaluación de la tasa de error de símbolos para SC-FDE y OFDM utilizando el esquema de ecualización ZF.....	59
3.5.	Análisis comparativo entre los sistemas SC-FDE y OFDM con y sin prefijo cíclico.....	61
3.6.	Simulación para calcular la relación de potencia pico a promedio. 62	
3.6.1.	Resultado obtenido de la PAPR para sistemas SC-FDMA utilizando modulación QPSK.	64
3.6.2.	Resultado obtenido de la PAPR para sistemas SC-FDMA utilizando modulación 16-QAM.....	65
3.6.3.	Resultado obtenido de la PAPR para sistemas OFDMA utilizando modulaciones QPSK y 16-QAM.....	66
3.7.	Simulación para calcular la capacidad del sistema MIMO.....	67
Conclusiones		70
Recomendaciones		70
Bibliografía		72

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2:

Figura 2. 1: Descripción general de la tecnología WiMAX.	27
Figura 2. 2: Diagrama de bloques de la reseña histórica del estándar IEEE 802.16.....	31
Figura 2. 3: Arquitectura general de la tecnología WiMAX.	35
Figura 2. 4: Opciones de configuración de una BS.....	36
Figura 2. 5: Ejemplo de una red WiMAX con tres ASN-GW.	37
Figura 2. 6: Modelo de referencia de una red WiMAX.	38
Figura 2. 7: Modelo de referencia de la red WiMAX con ASN.	38
Figura 2. 8: Modelo de funciones realizadas en puntos de referencia.	39
Figura 2. 9: Funcionalidad de WiMAX entre una BS y usuarios.....	40
Figura 2. 10: Despliegue de WiMAX a CPEs.....	41
Figura 2. 11: Arquitectura básica de LTE utilizando E-UTRAN.....	44
Figura 2. 12: Funcionalidad de la interfaz LTE-Uu.....	45
Figura 2. 13: Otro tipo de arquitectura de LTE.....	46
Figura 2. 14: Diferencias entre OFDM y OFDMA.....	48
Figura 2. 15: Trama de Tipo 1 para enlaces descendentes.....	50
Figura 2. 16: Relación entre un bloque de recursos y frecuencia.	52

Capítulo 3:

Figura 3. 1: Diseño en Simulink para la simulación del nivel de enlace de SC-FDE.....	56
Figura 3. 2: Diseño en Simulink para la simulación del nivel de enlace de OFDM.	56
Figura 3. 3: Resultado de métricas de la SER entre sistemas SC-FDE y OFDM usando esquemas de ecualización del estimador MMSE.....	58

Figura 3. 4: Resultado de las métricas de la SER entre sistemas SC-FDE y OFDM usando esquemas de ecualización del estimador ZF.....	60
Figura 3. 5: Resultado de las métricas entre sistemas SC-FDE y OFDM con y sin prefijo cíclico usando el canal ITU Veh.	62
Figura 3. 6: Diagrama de bloques de la simulación para calcular la PAPR en el sistema SC-FDMA.	63
Figura 3. 7: Resultado de las métricas del sistema SC-FDMA usando QPSK.	64
Figura 3. 8: Resultado del cálculo obtenido de PAPR para el esquema de modulación 16-QAM.	65
Figura 3. 9: Diagrama de bloques para calcular la PAPR del sistema OFDMA.	66
Figura 3. 10: Gráfica comparativa de PAPR entre modulaciones QPSK y 16-QAM para el sistema OFDMA.....	67
Figura 3. 11: Gráfica comparativa en términos de capacidad para sistemas SISO y MIMO.....	68

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 2:

Tabla 2. 1: Descripción de los estándares IEEE 802.16.	29
Tabla 2. 2: Información elemental de los estándares IEEE 802.16.	34
Tabla 2. 3: Resumen de los anchos de banda disponible en LTE.	49
Tabla 2. 4: Velocidades pico de bits para DL en LTE.	54
Tabla 2. 5: Velocidades pico de bits para UL en LTE.	54

Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Parámetros de simulación.	57
Tabla 3. 2: Cuadro comparativo entre los sistemas SC-FDE y OFDM usando diferentes canales con ecualización MMSE.	59
Tabla 3. 3: Cuadro comparativo entre los sistemas SC-FDE y OFDM usando el canal ITU Vehicular con ecualización MMSE.	59
Tabla 3. 4: Cuadro comparativo entre los sistemas SC-FDE y OFDM usando diferentes canales con ecualización ZF.	61
Tabla 3. 5: Cuadro comparativo entre los sistemas SC-FDE y OFDM usando el canal ITU Vehicular con ecualización ZF.	61
Tabla 3. 6: Cuadro comparativo entre los sistemas SC-FDE y OFDM con y sin prefijo cíclico.	62
Tabla 3. 7: Parámetros usados en la simulación de calcular PAPR para el sistema SC-FDMA.	64
Tabla 3. 8: Parámetros usados en la simulación de calcular PAPR para el sistema OFDMA.	66
Tabla 3. 9: Resumen de datos comparativos entre SISO y MIMO con una relación señal-ruido de 5 dB.	69
Tabla 3. 10: Resumen de datos comparativos entre SISO y MIMO con una relación señal-ruido de 14 dB.	69

Resumen

El presente trabajo de titulación consiste en realizar un análisis comparativo entre las tecnologías WiMAX y LTE a nivel de capacidad y cobertura empleando esquemas de modulación y codificación sobre la plataforma Matlab/Simulink. Inicialmente, se realiza la búsqueda bibliográfica de trabajos de titulación e investigación publicados en repositorios y revistas científicas. Después, se realiza una descripción teórica de las comunicaciones inalámbricas, como WiMAX y LTE, lo que permitió establecer las bases teóricas para el desarrollo de los escenarios de simulación. Posteriormente, se tuvo que pensar en la plataforma de simulación idónea para modelar las redes WiMAX y LTE. Se realizó un análisis entre las plataformas: Opnet Modeler, NS-3, OMNeT y Matlab/Simulink. Este último se escogió por su robustez en el momento de realizar simulaciones utilizando diagramas de bloques de Simulink. Finalmente, se diseñaron los escenarios para WiMAX y LTE utilizando esquemas de modulación y codificación, cuyos resultados fueron muy óptimos y que encajan a los parámetros definidos en los estándares que operan estas dos tecnologías.

Palabras claves: COMUNICACIONES INÁLAMBRICAS, WIMAX, LTE, OFDM, MODULACIÓN, CODIFICACIÓN.

Abstract

The present Final Career Project consists of performing a comparative analysis between WiMAX and LTE technologies at the capacity level and coverage using modulation and coding schemes on the Matlab / Simulink platform. Initially, you have to work in the bibliographic search of titles and research works published in repositories and scientific journals. Then, a theoretical description of the wireless communications is made, such as WiMAX and LTE, which allowed establishing the theoretical basics for the development of the simulation scenarios. Subsequently, we had to think about the ideal simulation platform to model the WiMAX and LTE networks. An analysis was made between the platforms: Opnet Modeler, NS-3, OMNeT and Matlab/Simulink. The last one was chosen for its robustness at the time of making simulations using Simulink block diagrams. Finally, the scenarios for WiMAX and LTE were designed using modulation and coding, whose results were very good and which fit the parameters defined in the standards that operate these two technologies.

Palabras claves: WIRELESS COMMUNICATIONS, WIMAX, LTE, OFDM, MODULATION, CODING.

Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.

1.1. Introducción.

La interoperabilidad mundial del estándar IEEE802.16 para el acceso de microondas, resulta ser una técnica utilizada básicamente para la conexión inalámbrica y de banda ancha para permitir el acceso a Internet de alta velocidad para largas distancias. La interoperabilidad mundial para el acceso por microondas (*Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX*) desempeñará un papel importante en el mercado de acceso inalámbrico de banda ancha fijo (*Fixed Broadband Wireless Access, FBWA*) ya que es más rentable y más rápido de configurar. WiMAX es un sistema fijo de acceso inalámbrico de banda ancha (*Broadband Wireless Access, BWA*) basado en el estándar IEEE 802.16. WiMAX es utilizado para accesos fijos y móviles. Hoy en día las estaciones fijas pueden acceder hasta velocidades de 40 Mbps y se espera en el futuro para 1 Gbps. (More & Mishra, 2012)

Mientras que para Rezaei, Hempel, & Sharif, (2012) los esfuerzos de desarrollo de estándares de comunicación inalámbrica se han intensificado significativamente en las últimas décadas para satisfacer las demandas de tecnologías más sofisticadas en el campo de las telecomunicaciones, con el fin de satisfacer las demandas de los usuarios y las aplicaciones. En este sentido, los desarrolladores de los estándares como IEEE y 3GPP desarrollaron el estándar de cuarta generación, que aprovecha las nuevas tecnologías y proporcionan una velocidad de datos mejorada, rendimiento de límite de celdas, consumo de energía, latencia, etc.

WiMAX como ya se mencionó en sí está estandarizado como IEEE 802.16, el mismo que proporciona hasta 16 km de acceso inalámbrico de banda ancha para estaciones fijas y de 4.8 a 16 km para estaciones móviles. Mientras, que para LTE-4G se basa en las tecnologías GSM/EDGE y UMTS existentes. Por ejemplo, la tasa de datos mejorada para la evolución de GSM (*Enhanced Data rates for GSM Evolution, EDGE*) conocido como el sistema celular móvil 2.5 G que utiliza el esquema de transferencia de datos a través de la modulación 8-PSK para lograr velocidades de datos de 384 kbps. En el

caso del sistema universal de telecomunicaciones móviles (*Universal Mobile Telecommunications System, UMTS*) conocido como el sistema celular móvil 3G que evolucionó a partir de GSM, que utiliza la tecnología de interfaz de aire de acceso múltiple por división de código de banda ancha (*Wideband Code Division Multiple Access, WCDMA*) para alcanzar velocidades de bits de abonado de hasta 2 Mbps. (Zubairi, Erdogan, & Reich, 2015)

Mientras, que LTE es la tecnología 4G dominante que proporciona tasas de pico de enlace descendente de 300 Mbps, velocidades de pico de enlace ascendente de 75 Mbps y una latencia de transferencia de menos de 5 ms para aplicaciones de QoS. En los últimos años, la demanda de acceso de banda ancha ha crecido rápidamente debido a un aumento en las aplicaciones multimedia basadas en Internet. El problema, sin embargo, es que el acceso por cable de banda ancha es caro y no se puede proporcionar a ubicaciones remotas. Aunque, WiMAX es la primera tecnología de acceso inalámbrico de banda ancha que elimina los costos de cableado y ofrece una solución de bajo costo.

Los sistemas de comunicaciones inalámbricos pueden ser modelados a través del uso de herramientas (software) de simulación, debido a que evaluar una red real podría significar costo muy elevado en la adquisición de equipos de medición. Por ejemplo, en la publicación de Hsieh, Lee, Wu, Hsu, & Chien, (2017) sostienen que el uso de software para desarrollar simulaciones, existen ventajas de tener mayor comodidad para crear escenarios de simulación y establecer un procedimiento de supervisión. Con el fin de modificar rápidamente el escenario y revisar los conceptos del estudio, el software de simulación se ha convertido en el principal método para cumplir con los conceptos de estudio de los investigadores. Debido a la naturaleza de la innovación y la excelencia en el estudio académico, el software de simulación encuentra con frecuencia que las funciones modulares existentes son inadecuadas y deben agregarse o modificarse.

Cómo encontrar el software de simulación más adecuado siempre es un tema difícil e importante, que puede ser determinado por algunas métricas de

evaluación, como fidelidad, idoneidad, extensibilidad, escalabilidad, soporte del usuario, tiempo de aprendizaje, implementación amigable, rendimiento, costo, etc.

1.2. Antecedentes.

Los accesos inalámbricos de banda ancha fijos y móviles, como WiMAX y LTE-4G permiten a muchos profesionales de la investigación de telecomunicaciones el desarrollo de trabajos a nivel de simulación. Se realizó una búsqueda de información en repositorios de tesis y artículos científicos en revistas de alto impacto, como, por ejemplo, IEEE Xplore Digital Library. Se encontraron trabajos de tesis de maestría y artículos científicos en las que centran sus investigaciones en la simulación de redes WiMAX y LTE-4G de manera individual y en otras realizan comparativas entre ambas tecnologías inalámbricas.

A continuación, se describen trabajos de tesis o titulación de maestría en telecomunicaciones relacionados a simulaciones de WiMAX y LTE los mismos se encuentran disponibles en el repositorio digital de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil:

1. El trabajo de titulación de Muñoz M., (2014) realizó el modelado y evaluación de una red de voz sobre LTE, conocido como VoLTE. Aunque este trabajo fue realizado en el 2014, en la actualidad esta tecnología aún no está disponible en Ecuador. La plataforma de simulación utilizada para modelar la red VoLTE fue OPNET Modeler.
2. El trabajo de titulación de Coello B., (2015) realizó la simulación de una red WiMAX mediante Matlab/Simulink. Mediante el modelado de varios escenarios de SISO y MIMO, y la variación de parámetros de subportadoras.
3. El trabajo de titulación de Navarro V., (2015) realizó la simulación de señales distribuidas en RoF para redes WiMAX a través de la modulación OFDM y 64-QAM utilizando MatLab/Simulink y OptiSystem.
4. El trabajo de titulación de Monserrate C., (2017) consistió en evaluar el rendimiento de la capa física del estándar IEEE 802.16 usando

diferentes esquemas de modulación. La simulación de la red WiMAX fue a nivel de la capa física que funciona con la multiplexación OFDM, utilizando canales entre la etapa de transmisión y recepción. Demostró la eliminación del ruido mediante esquemas de modulación.

5. El trabajo de titulación de (Castillo C., 2017) estudio y analizo las tecnología LTE y LTE-Advanced a nivel de core de voz, sobre las principales diferencias entre ellas. Demostró que la red híbrida y el mecanismo CS Fallback no están presentes en las redes LTE Advanced nativas.

Los trabajos encontrados no realizaron comparativas entre las tecnologías WiMAX y 4G-LTE, para lo cual fue necesaria la búsqueda de investigaciones relacionadas a la comparativa de estos estándares. A continuación, se describen los trabajos relacionados al presente trabajo de titulación:

1. El trabajo publicado por Rodriguez & Esmailpour, (2016) realizaron el aprovisionamiento integrado de QoS para redes LTE – WiMAX unificadas. En el artículo proponen un marco de QoS para proporcionar una clasificación de tráfico eficiente y óptima y una interoperabilidad de extremo a extremo en una red WiMAX - LTE unificada. Diseñaron una simulación en entorno integrado con la interconexión de redes WiMAX y LTE, para evaluar el rendimiento del marco propuesto al transmitir tráfico en tiempo real (*Real Time, RT*) y no RT, en escenarios aislados y mixtos. Los resultados de la simulación muestran que el marco propuesto puede proporcionar soporte de QoS de extremo a extremo al mismo tiempo que satisface los requisitos de tráfico de las aplicaciones.
2. El trabajo publicado por Mori, Chandarana, Gajjar, & Dasi, (2015) realizaron la comparación de rendimiento de diferentes esquemas de modulación en tecnologías avanzadas WiMAX y LTE. El artículo evalúa las características de dos tecnologías avanzadas en la capa física, y también ofrece un análisis del rendimiento de diferentes esquemas de modulación (BPSK, QPSK y 16-QAM) en las tecnologías WiMAX y LTE.

3. El trabajo publicado por Srikanth, Murugesu Pandian, & Fernando, (2012) realizaron una comparativa del acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal entre WiMAX y LTE. Demostraron, que la ventaja de diversidad multiusuario de OFDMA se usa bien en LTE, mientras que la ventaja de la diversidad de frecuencia se aprovecha muy bien en WiMAX. La sobrecarga de la capa física en LTE es significativamente mejor que en WiMAX. El proceso de entrada a la red LTE móvil es más simple que en un WiMAX móvil. Adicionalmente, comprobaron durante la investigación que el diseño de OFDMA en WiMAX cubrirá condiciones de canal más extremas.

A continuación, se describen brevemente otros artículos de investigación en las que desarrollan modelados de simulación utilizando ambas tecnologías, WiMAX y 4G-LTE, pero no realizan un análisis comparativo entre ellas:

1. El artículo de investigación de Hsieh et al., (2017) desarrollaron un simulador de red inalámbrica basado en patrones de diseño para WiMAX y LTE. Ellos propusieron una arquitectura de simulación llamada CCGns, como un entorno de red virtual para eventos discretos y considerando el estándar IEEE 802.16-2009. Con CCGns se contribuye en cinco aspectos: una arquitectura escalable de gestión y procesamiento de mensajes MAC, una arquitectura de red de retransmisión multisalto aplicable, un algoritmo de asignación de ancho de banda de varianza mínima de dos etapas, una interfaz operativa de planificador común basada en factores compuestos comparable, y una arquitectura de estructura de tramas intercambiables para WiMAX y LTE. Finalmente, reemplazaron la estructura de trama de WiMAX con la de LTE y justificaron el rendimiento del sistema de la arquitectura de red de retransmisión tanto para WiMAX y LTE.
2. El artículo de investigación de Bagubali, Prithiviraj, & Mallick, (2016) realizaron el análisis de rendimiento de arquitecturas de integración LTE y WIMAX basadas en IMS. El trabajo inicia con los desafíos involucrados en las integraciones y luego explica el papel de los diferentes acoplamientos y arquitecturas. Este documento también mejora aún más las arquitecturas de integración LTE y Wimax para

proporcionar un traspaso vertical sin interrupciones y una calidad de servicio flexible para admitir servicios de voz, video, multimedia a través de redes IP y gestión de movilidad con la ayuda de redes IMS. Se lleva a cabo la evaluación de varios parámetros, como el retraso en el traspaso, el costo de la señalización, la pérdida de paquetes, y se analiza el rendimiento de la arquitectura de interfuncionamiento a partir de los resultados de la simulación. Finalmente, concluye que el escenario de capas cruzadas es mejor que el escenario de capas no cruzadas.

3. El artículo de investigación de Roodaki, Raahemifar, & Raahemi, (2014) realizaron el análisis de calidad de servicios en LTE y WiMAX móvil. Ellos diseñaron el modelo de simulación para analizar los rendimientos de LTE y WiMAX en enlaces descendentes utilizando un enfoque analítico para estimar la calidad de los servicios en función de sus parámetros, incluidos el retraso y la tasa de errores de bit (*Bit Error Rate, BER*). Simularon la capa física y de enlace de datos, la primera mediante el modelo de canal de Markov de estado finito (*Finite State Markov Channel, FSMC*) para calcular la BER. Mientras, que para la capa de enlace de datos usaron el modelo de ancho de banda efectivo para tráfico de velocidad constante y variable. Demostraron, que WiMAX proporciona una mejor calidad de servicio en relación señal a ruido (*Signal Noise Ratio, SNR*) promedio bajo. Sin embargo, al aumentar la SNR promedio, ambas tecnologías proporcionan casi la misma QoS.

1.3. Definición del problema

Los trabajos de titulación de la maestría no se encontraron investigaciones en la comparativa de las tecnologías WiMAX y 4G-LTE. De acuerdo a esto, surge la necesidad de realizar el análisis comparativo de la capacidad y cobertura en redes WiMAX y 4G utilizando esquemas de modulación y codificación.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General:

Realizar el análisis comparativo de la capacidad y cobertura en redes WiMAX y 4G utilizando esquemas de modulación y codificación

1.4.2. Objetivos específicos:

- ✓ Describir la fundamentación teórica de la tecnología WiMAX y 4G-LTE que sustentan las bases del presente trabajo de titulación.
- ✓ Elaborar los escenarios de simulación a nivel de capacidad y cobertura en las redes WiMAX y 4G-LTE aplicando esquemas de modulación y codificación.
- ✓ Analizar los resultados obtenidos de la comparativa entre redes WiMAX y 4G a través de esquemas de modulación y codificación.

1.5. Hipótesis

Mediante el análisis comparativo de la capacidad y cobertura en redes WiMAX y 4G utilizando esquemas de modulación y codificación permitirá que el presente trabajo de titulación contribuya con una herramienta para posteriores investigaciones donde coexistan las redes analizadas en este documento.

1.6. Metodología de investigación.

La investigación a veces se confunde con la recopilación de información, la documentación de hechos y la búsqueda de información. La investigación es el proceso de recopilación, análisis e interpretación de datos para comprender un fenómeno. El proceso de investigación es sistemático en cuanto a que la definición del objetivo, la gestión de los datos y la comunicación de los hallazgos ocurren dentro de los marcos establecidos y de acuerdo con las directrices existentes. Los marcos y las directrices brindan a los investigadores una indicación de qué incluir en la investigación, cómo realizar la investigación y qué tipos de inferencias son probables en función de los datos recopilados.

La investigación se origina con al menos una pregunta sobre un fenómeno de interés. Por ejemplo, ¿qué tipo red de comunicación inalámbricas es el apropiado en comunidades rurales sin acceso a tecnologías de la información? O bien, ¿qué factores tecnológicos pueden influir en los sectores rurales sin acceso al internet? Las preguntas de investigación, como las dos preguntas anteriores, ayudan a los investigadores a enfocar los pensamientos, gestionar los esfuerzos y elegir el enfoque apropiado o la perspectiva desde la cual dar sentido a cada fenómeno de interés.

Los tres enfoques comunes para realizar investigación son los métodos cuantitativos, cualitativos y mixtos. El investigador anticipa el tipo de datos necesarios para responder a la pregunta de investigación. Por ejemplo, ¿se necesitan datos numéricos, textuales o numéricos y textuales? Con base en esta evaluación, el investigador selecciona uno de los tres enfoques antes mencionados para realizar investigación. Los investigadores generalmente seleccionan el enfoque cuantitativo para responder a preguntas de investigación que requieren datos numéricos, el enfoque cualitativo para preguntas de investigación que requieren datos textuales, y el enfoque de métodos mixtos para preguntas de investigación que requieren datos numéricos y textuales.

En el presente trabajo de titulación se basará en el enfoque de investigación cuantitativa. La investigación cuantitativa surgió alrededor de 1250 a.D. y fue impulsada por los investigadores con la necesidad de cuantificar los datos. Desde entonces, la investigación cuantitativa ha dominado la cultura occidental como el método de investigación para crear significado y nuevos conocimientos. Lo que constituye un método de investigación cuantitativa implica un enfoque numérico o estadístico para el diseño de la investigación.

La investigación cuantitativa es específica en su estudio y experimentación, ya que se basa en las teorías existentes. La metodología de una investigación cuantitativa mantiene el supuesto de un paradigma empirista. La investigación en sí es independiente del investigador. Como

resultado, los datos se usan para medir objetivamente la realidad. La investigación cuantitativa crea significado a través de la objetividad descubierta en los datos recopilados.

Los métodos cuantitativos son:

a) investigación de intervención

Explicar si una intervención influye en un resultado para un grupo en comparación con otro grupo

b) investigación de no intervención

Asociar o relacionar variables en un patrón predecible para un grupo de individuos

Capítulo 2: Fundamentos de redes WiMAX y LTE.

2.1. Definiciones básicas de WiMAX.

WiMAX, es una tecnología de telecomunicaciones con el objetivo de proporcionar datos inalámbricos a grandes distancias con enlaces punto a punto (*Point-to-Point, P2P*) de acceso tipo celular. WiMAX significa Interoperabilidad mundial para acceso por microondas (*Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX*) aunque comúnmente conocida como un sistema de comunicaciones inalámbricas de redes de área metropolitana. Esta tecnología puede proporcionar servicios de banda ancha de acceso inalámbrico (*Broadband Wireless Access, BWA*) hasta 50 km para estaciones fijas y entre 5 a 15 km para estaciones móviles.

Wimax es una tecnología basada en estándares del instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos (IEEE), que permiten acceso inalámbrico de banda ancha para última milla como alternativa a la banda ancha alámbricas, como por ejemplo la línea de suscripción digital (*Digital Subscriber Line, DSL*). La tecnología de banda ancha móvil es posible sin la necesidad de línea de vista (*Line Of Sight, LOS*) con una estación base en un radio celular típico entre 3 y 10 km. Aunque, ya existen sistemas con capacidad de hasta 40 Mbps por canal, para aplicaciones de acceso fijo o portátil.

Muchas compañías observaron de cerca la tecnología WiMAX para usar la conectividad de última milla para altas velocidades de datos. La competencia resultante puede traer precios más bajos tanto para clientes residenciales o corporativos. Las aplicaciones más destacadas para WIMAX son:

- Conexión de Hotspot WI-FI entre sí.
- Proporcionar una alternativa inalámbrica de acceso de banda ancha más económica que el DSL para última milla.
- Proporcionar servicios de datos y telecomunicaciones de alta velocidad.

- Proporcionar diversidad en la conectividad a internet como parte de un plan de negocios continuos. Es decir, si una empresa tiene una conexión inalámbrica a internet, es poco probable que se vean afectados por interrupciones de servicios.
- Proporcionar conectividad nómada.

Los datos de alta velocidad y la conectividad nómada de la tecnología WIMAX tiene la libertad y conveniencia para los clientes de tener acceso a internet cuando y donde lo necesiten siempre y cuando estén dentro de un radio de acción, permitiendo tener conectado a comunidades. La banda ancha permite el uso continuo de todas las aplicaciones de internet que actualmente se utilizan y para posibles futuros usos como los que se muestran en la figura 2.1.

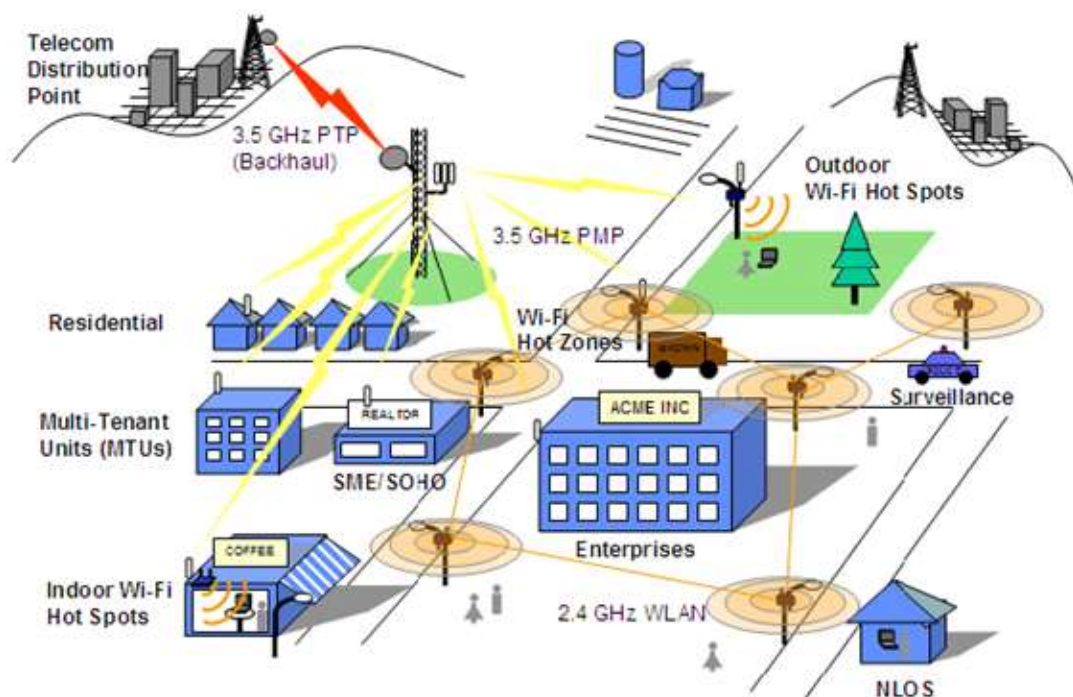


Figura 2. 1: Descripción general de la tecnología WiMAX.

Fuente: (Gupta, 2009)

La mayoría de aplicaciones de Internet que utilizan la tecnología WiMAX permite:

- Juegos en tiempo real:** opera con velocidad apropiada para el juego multijugador en 3D, video streaming y escuchar emisoras de radio.

- b. Trabajo más inteligente:** Wimax es más productivo, es decir, que ahorra tiempo en realizar las actividades donde antes no se tenía acceso a internet. El trabajo móvil cambia las reglas del juego y competencia al permitirnos ser más productivos.
- c. Mantenerse en contacto:** el internet de banda ancha permite mantener el contacto con familia, amigos o empleados usando herramientas típicas como el correo electrónico, Messenger, WhatsApp, entre otras aplicaciones de redes sociales. Además, añade videoconferencia gracias a la conexión de WIMAX.
- d. Localización de personas y lugares:** Wimax permite un estilo de vida espontánea. Los servicios basados en localización crean un nuevo paradigma en el acceso en tiempo real de la información donde y cuando se lo necesite.
- e. Recepción de TV y radio en movimiento:** las estaciones de radio ya co-difunden a través de internet. Las transmisiones televisivas basadas en internet móvil también muestran el contenido de la televisión como películas o eventos deportivos.

2.2. Estándares de WiMAX.

La tecnología WIMAX se basa en el estándar IEEE 802.16, que también se denomina red de área metropolitana (*Metropolitan Area Network, MAN*) inalámbrica, o también denominada WMAN. El estándar IEEE 802.16 se formó en 1998 para desarrollar un sistema de transmisión de banda ancha inalámbrica. El enfoque inicial del grupo fue el desarrollo de un sistema de banda ancha inalámbrica punto a multipunto basado en operación de banda milimétrica de 10 a 66 GHz. El estándar resultante (estándar 802.16 original, finalizada en diciembre del 2001) se basó en una capa física (PHY) de portador única con una capa de control de acceso al medio (*Media Access Control, MAC*) multiplexada por división de tiempo (*Time Division Multiplexing, TDM*) de ráfagas. En la tabla 2.1 se muestran brevemente los estándares de IEEE 802.16.

El estándar IEEE 802.16 produjo posteriormente el estándar IEEE 802.16a, una modificación que permite integrar enlaces sin línea de vista (*Non*

Light Of Sight, NLOS) en la banda de 2 a 11 GHz, utilizando la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM*). Se hicieron adiciones a la capa MAC, tales como el soporte para la división de frecuencia ortogonal de acceso múltiple (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA*). Otras revisiones resultaron en un nuevo estándar para el 2004, denominado IEEE 802.16-2004, que reemplazaba todas las versiones anteriores y formó la base para la primera solución WiMAX.

Tabla 2. 1: Descripción de los estándares IEEE 802.16.

	IEEE 802.16	IEEE 802.16-2004	IEEE 802.16e-2005
Estado	Finalizado en diciembre 2001	Finalizado en junio 2004	Finalizado en diciembre 2005
Banda de frecuencia	10 GHz - 66 GHz 2 GHz – 11 GHz	2 GHz – 11 GHz para fijo	2 GHz – 6 GHz para aplicaciones móviles.
Aplicación	LOS para fijo	NLOS para fijo	NLOS para fijo y móvil
Arquitectura MAC	Enmallado punto a multipunto	Enmallado punto a multipunto	Enmallado punto a multipunto
Esquema de transmisión	Única portadora	Única portadora, 256 OFDM o 2048 OFDM	Única portadora, 256 OFDM o OFDM escalable con 128, 512, 1024 o 2048 subportadoras
Tasa de datos	32 Mbps - 134.4 Mbps	1 Mbps – 75 Mbps	1 Mbps – 75 Mbps
Multiplexación dúplex	TDM/TDMA	TDM/TDMA/OFDMA	TDM/TDMA/OFDMA
Anchos de banda del canal	TDD y FDD	TDD y FDD	TDD y FDD
Designación de interfaz de aire	Wireless MAN-SC	Wireless MAN-SCa Wireless MAN-OFDM Wireless MAN-OFDMA Wireless HUMANA	Wireless MAN-SCa Wireless MAN-OFDM Wireless MAN-OFDMA Wireless HUMANA
Implementación de WIMAX	No aplica	256-OFDM como WIMAX fijo.	Escalable OFDMA como WIMAX móvil

Fuente: (Eklund, 2006)

Estas primeras soluciones WiMAX se basan en el estándar IEEE 802.16-2004 que son aplicaciones específicas fijas, es decir, que se refiere a estos como WiMAX fijo. En diciembre del 2005, IEEE completo y aprobó el estándar IEEE 802.16e-2005, una enmienda a la normativa IEEE 802.16-2004 que permitió agregar soporte de movilidad. En otras palabras, el estándar IEEE 802.16e-2005 constituye la base para la WiMAX tanto para aplicaciones fijas y móviles.

Actualmente, la tecnología WiMAX tiene dos perfiles de sistema diferentes: uno basado en la normativa IEEE 802.16-2004, OFDM PHY, denominado perfil de sistema fijo; y el otro basado en la normativa IEEE 802.16e-2005 escalable OFDMA PHY, llamado perfil de sistema de movilidad. Un perfil de certificación se define como una instancia particular de un perfil del sistema donde también se especifican la frecuencia de operación, el ancho de banda del canal y también se especifica el modo dúplex. Los equipos de la tecnología WiMAX están certificados para la interoperabilidad contra un perfil de certificación particular.

Mientras, que Wimax Forum ha establecido hasta ahora cinco perfiles de certificación para servicios fijos y catorce perfiles de certificación de servicios con movilidad. Hasta la fecha hay dos perfiles WiMAX fijos contra los que se han certificado los equipos. Estos son sistemas de frecuencia de 3.5 GHz que operan sobre un canal de 3.5 MHz, utilizando el perfil de sistema fijo basado en la capa física IEEE 802.16-2004 OFDM con una MAC punto a multipunto. Uno de los perfiles utiliza la duplexación por división de frecuencia (*Frequency Division Duplexing, FDD*), y el otro utiliza la duplexación de división de tiempo (*Time Division Duplexing, TDD*).

Con la finalización del estándar IEEE 802.16e-2005, WiMAX ha cambiado radicalmente hacia el desarrollo y certificación de perfiles de sistemas WiMAX1 basados en este nuevo estándar. Todos los perfiles WiMAX móviles utilizan OFDMA escalable como la capa física. Al menos inicialmente, todas las movilidades de los perfiles utilizan una MAC punto a multipunto. Cabe señalar también, que todos los candidatos de perfiles actuales de

movilidad son basados en TDD. Aunque a menudo se prefiere TDD, es posible que se necesiten perfiles FDD para cumplir a futuro con los requisitos reglamentarios de emparejamiento en determinadas bandas.

La figura 2.2 muestra en resumen la historia de las modificaciones a los estándares de IEEE 802.16 para la tecnología WiMAX.

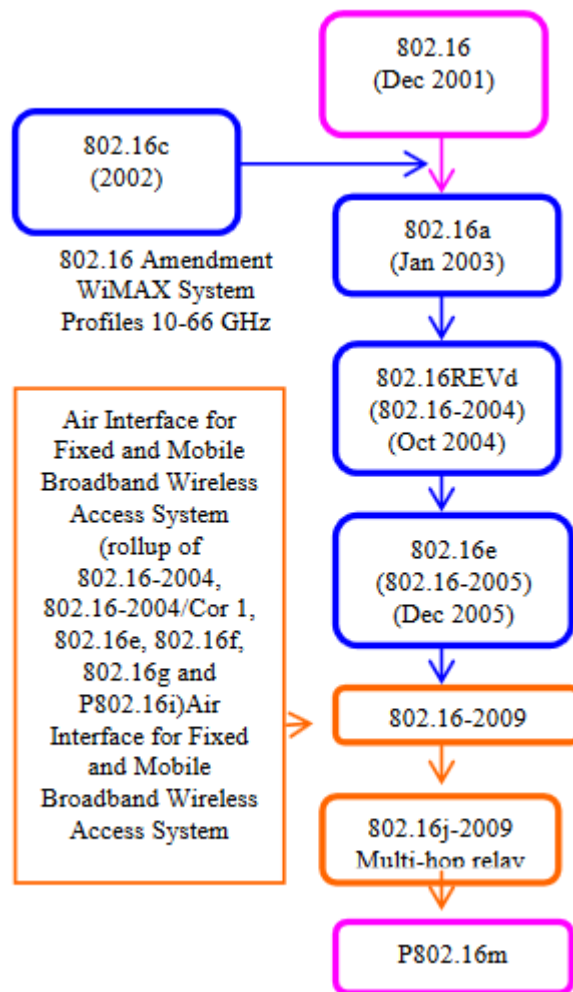


Figura 2. 2: Diagrama de bloques de la reseña histórica del estándar IEEE 802.16.
Fuente: (Seyedzadegan & Othman, 2013)

2.3. Asignación del espectro radioeléctrico.

Desde una perspectiva global, las bandas de 2.3 GHz, 2.5 GHz, 3.5 GHz y 5.7 GHz lo más probable es que sean despliegues de la tecnología WiMAX. Para lo cual, WiMAX Forum ha identificado esto para certificaciones de interoperabilidad inicial. Una breve descripción de estas bandas licenciadas y no licenciadas se dan a conocer en las siguientes secciones.

2.3.1. Bandas licenciadas de frecuencias para 2.5 GHz.

Se han asignado las bandas de frecuencias 2.5 GHz y 2.7 GHz para Estados Unidos, Canadá, México, Brasil y en algunos países del sudeste asiático. En muchos países, esta banda está restringida a aplicaciones fijas; mientras que, en otros países, no se permite la comunicación bidireccional. Entre todas las bandas disponibles, esta es la más prometedora para la radio de banda ancha, particularmente entre las frecuencias 2.495 GHz y 2.690 GHz. Las regulaciones permiten una variedad de servicios, incluyendo servicios fijos, portátiles y móviles. Se permiten las operaciones FDD y TDD.

Se emitieron licencias para ocho segmentos de 22.5 millones de MHz de esta banda, esta emparejado con un bloque de 6MHz, con separación de 10MHz a 55MHz. Las reglas de esta banda también permiten la adición de licencia. Sprint, Nextel y Clearwire controlan la mayoría de este espectro en los Estados Unidos. Es posible que, en muchos países, hacen que esta banda esté disponible y sea atractiva, particularmente para WiMAX móvil.

2.3.2. Bandas licenciadas de frecuencias para 2.3 GHz.

Esta banda es llamada WCS. Esto está disponible en muchos países como Estados Unidos, Australia, Corea del Sur y Nueva Zelanda. De hecho, los servicios WiBro que están desplegando en Corea del Sur utilizan esta banda. En los Estados Unidos esta banda incluye dos emparejadas de 5 MHz y dos en el rango de 2.305GHz a 2.320GHz y 2.345GHz a 2.360GHz. Un mayor requisito estricto para este espectro son la emisión fuera de la banda reforzado por la FCC para proteger los servicios de radio digital de audio (Digital Audio Radios Service, DARS) en las bandas adyacentes 2.320 GHz a 2.345GHz. Esto hace que los servicios de banda ancha, particularmente el de servicio móvil, sea dificultosa a banda cercanas a DARS.

2.3.3. Bandas licenciadas de frecuencias para 3.5 GHz.

Esta es la banda primaria asignada para la conectividad inalámbrica fija de banda ancha en varios países del mundo. En los Estados Unidos, el FCC asigno 50 MHz de espectro en la banda de 3.65 GHz a 3.70 GHz para el uso sin licencia de alta potencia con restricciones en los protocolos de transmisión

que excluyen a WiMAX. El ancho de banda disponible varía de un país a otro, pero es generalmente alrededor de los 200 MHz. La banda disponible suele dividirse en muchas licencias que varían entre 2.5 MHz a 2.56 MHz.

Las reglas de adición del espectro también varían de un país a otro. Mientras algunos países solo permiten operaciones con FDD, y en otros permiten operaciones con FDD o TDD. En la mayoría de países, las normas vigentes en esta banda no permitían la utilización de aplicaciones de banda ancha. Aunque, los reglamentos de esta banda con el tiempo se volvieron más flexibles.

2.3.4. Bandas exentas de licencia de frecuencias para 5 GHz.

La banda de frecuencia de 5.25 GHz a 5.85 GHz (exento de licencia) es de interés para la tecnología WiMAX. Esta banda está generalmente disponible en todo el mundo. Por ejemplo, en Estados Unidos, forma parte de la infraestructura nacional de la información sin licencia (Unlicensed National Information Infrastructure, U-NII) y tiene 200 MHz de espectro para uso libre. De acuerdo a la FCC el uso sin licencia ha identificado un espectro adicional de 255 MHz en esta banda. Exento para que cualquiera lo use, esta banda podría permitir despliegues de WiMAX, particularmente en áreas rurales y remotas.

El ancho de banda disponible puede permitir a los operadores coordinar frecuencias y mitigar los problemas de interferencia que rodean el uso de bandas exentas de licencias, particularmente en mercados desatendidos.

2.3.5. Bandas de ultra alta frecuencia – UHF.

El espectro de banda de UHF tiene excelente característica de propagación comparado con las otras bandas de microondas y por lo tanto es valioso, particularmente para dispositivos electrónicos, tales como, portátiles y teléfonos móviles. El mayor rango de cobertura posible en esta banda hace que la economía de despliegue sea particularmente atractiva para aplicaciones suburbanas y rurales.

2.3.6. Banda de servicios inalámbricos avanzados - AWS.

En agosto del 2006, la FCC subastó la banda de 1.710 GHz a 1.755 GHz emparejado a 2.110 GHz - 2.155 GHz como espectro para servicios inalámbricos avanzados (AWS) en los Estados Unidos. Esta banda ofrece 90 MHz de ancho de banda que puede ser viable para WIMAX a largo plazo. En la tabla 2.2 se muestran las designaciones de frecuencias y cantidad de espectro utilizados en los estándares IEEE 802.16.

Tabla 2. 2: Información elemental de los estándares IEEE 802.16.

Designación	Frecuencia de asignación	Cantidad de espectro
Acceso inalámbrico fijo (<i>Fixed Wireless Access, FWA</i>): 3.5 GHz	Principalmente entre 3.4 GHz - 3.6 GHz También disponibles en algunos países: 3.3 GHz – 3.4 GHz y 3.6 GHz – 3.8 GHz	Utiliza mayormente frecuencia de 200 MHz. Varía desde 2-5 MHz hasta 2-56 MHz emparejados en otros países
Servicios de radio de banda ancha (<i>Broadband Radio Services, BRS</i>): 2.5 GHz	Intervalo de frecuencias de 2.495 GHz a 2.690 GHz	Frecuencia a 194 MHz Licencias de 22.5 MHz, donde se combina una de 16 MHz con 6MHz
Servicios de comunicaciones inalámbricas (<i>Wireless Communications Services, WCS</i>)	Intervalos de frecuencias de 2.305 GHz – 2.320 GHz 2.345 GHz – 2.360 GHz	Dos frecuencias pareadas de 2 – 5 MHz y dos de 5 MHz sin aparear
Exento de licencia: 2.4 GHz	Intervalo de frecuencia de 2.405 GHz – 2.4835 GHz	Un bloque de frecuencia de 80 MHz
Exento de licencia: 5 GHz	Intervalo de frecuencias de 5.250 GHz – 5.350 GHz 5.725 GHz – 5.825 GHz	Frecuencia de 200 MHz disponible en EEUU, frecuencia de 255 MHz adicional que son asignadas
Banda de ultra alta frecuencia (<i>Ultra High Frequency, UHF</i>): 700 MHz	Frecuencias inferiores entre 698 MHz y 746 MHz, y frecuencias superiores entre 747 MHz y 792 MHz	Banda superior de 30 MHz, y banda inferior de 48 MHz
Servicios inalámbricos avanzados (<i>Advanced Wireless Services, AWS</i>)	Intervalo de frecuencias de 1.710 GHz – 1.755 GHz 2.110 GHz – 2.155 GHz	Frecuencias de 2 – 45 MHz emparejados

Fuente: (Seyedzadegan & Othman, 2013)

2.4. Arquitectura de la red WiMAX.

En la figura 2.3 se muestra la arquitectura de la tecnología WiMAX. La red general de WiMAX se divide lógicamente en tres partes:

1. Estaciones móviles utilizadas por el usuario final para acceder a la red.
2. La red de acceso al servicio (*Access Service Network, ASN*), que comprende una o más estaciones base (*Station Base, BS*) y una o más pasarelas ASN que forman la red de acceso de radio (*Radio Access Network, RAN*).
3. La red de servicios de conectividad (*Connectivity Service Network, CSN*), que proporciona conectividad IP y las funciones principales de la red IP.

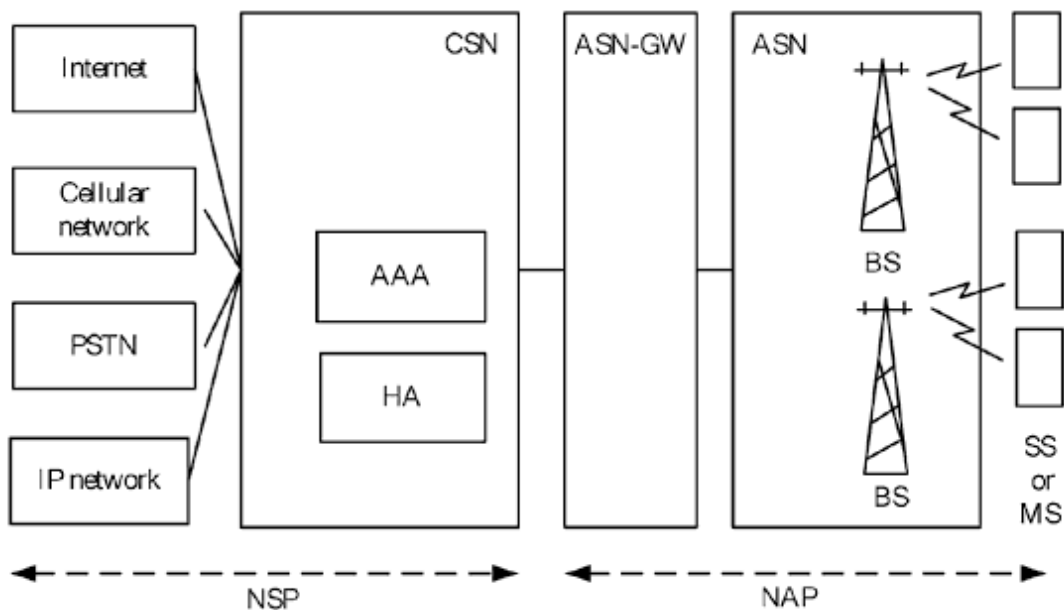


Figura 2. 3: Arquitectura general de la tecnología WiMAX.

Fuente: (Kumar, 2015)

El entorno de trabajo de la arquitectura de red, se define de tal manera que los múltiples usuarios puedan ser parte de los servicios WiMAX, más específicamente, la arquitectura permite tres entidades:

1. Proveedor de acceso a la red (*Network Access Provider, NAP*) que posee y opera la ASN,
2. Proveedor de servicios de la red (*Network Services Provider, NSP*), que proporciona conectividad IP y servicios WiMAX a los suscriptores que utilizan la infraestructura ASN proporcionados por uno o más NAPs, y
3. Proveedor de servicios de aplicación (*Application Service Provider, ASP*), que da un valor agregado a los servicios, como las aplicaciones

multimedia que utilizan subsistemas multimedia IP (*IP Multimedia Subsystem, IMS*) y las redes privadas virtuales (*Virtual Private Networks, VPN*) corporativa que se ejecutan sobre IP.

El modelo de referencia de la red fue desarrollado por la red de trabajo “WiMAX Group”, que es la que se encarga de definir una serie de entidades funcionales e interfaces entre ellas, se tienen:

2.4.1. Estación base (BS).

La BS es responsable de proporcionar la interfaz de aire a la estación móvil (*Mobile Station, MS*). Otras funciones que pueden ser parte de la BS son la micro-movilidad, funciones de gestión, como la activación de traspaso y establecimiento de túneles, gestión de recursos de radio, cumplimiento de políticas de calidad de servicio (*Quality of Service, QoS*), clasificación de tráfico, proxy DHCP (protocolo de control dinámico de host), administración de claves, gestión de sesión de multidifusión. En la figura 2.4 se muestra las opciones de configuración de una estación base.

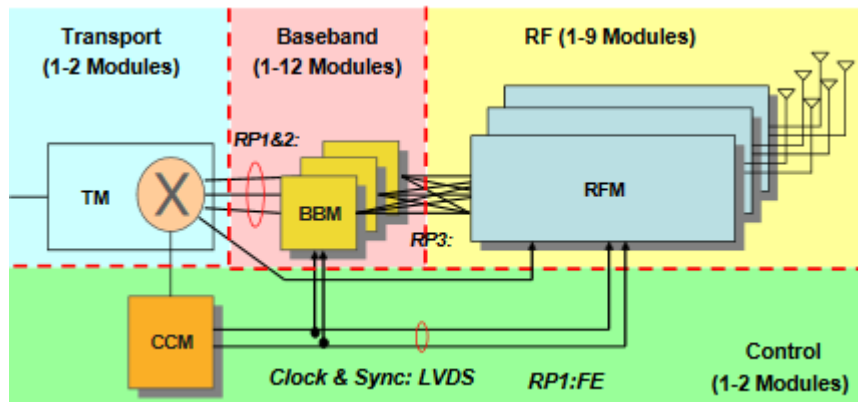


Figura 2. 4: Opciones de configuración de una BS.

Fuente: (OBSAI, 2006)

2.4.2. Puerta de enlace de la red de accesos al servicio (ASN-GW).

La puerta de enlace ASN (*ASN GateWay, ASN-GW*) actúa típicamente como puntos de adición de tráfico de la capa 2 dentro de una ASN. Las funciones adicionales que pueden incluirse en la puerta de enlace de la ASN incluyen la gestión de paginación, gestión de recursos de radio y control de admisión, almacenamiento de cache de perfiles de abonado y claves de cifrado, funcionalidad de cliente AAA, establecimiento y gestión de túnel de

movilidad con estaciones base, QoS y políticas para funcionalidad de agentes extranjeros para IP móvil, y CNS. Los autores Yang, Jan, Chen, & Lin, (2010) describen un ejemplo de una red WiMAX con tres ASN-GW, tal como se muestra en la figura 2.5.

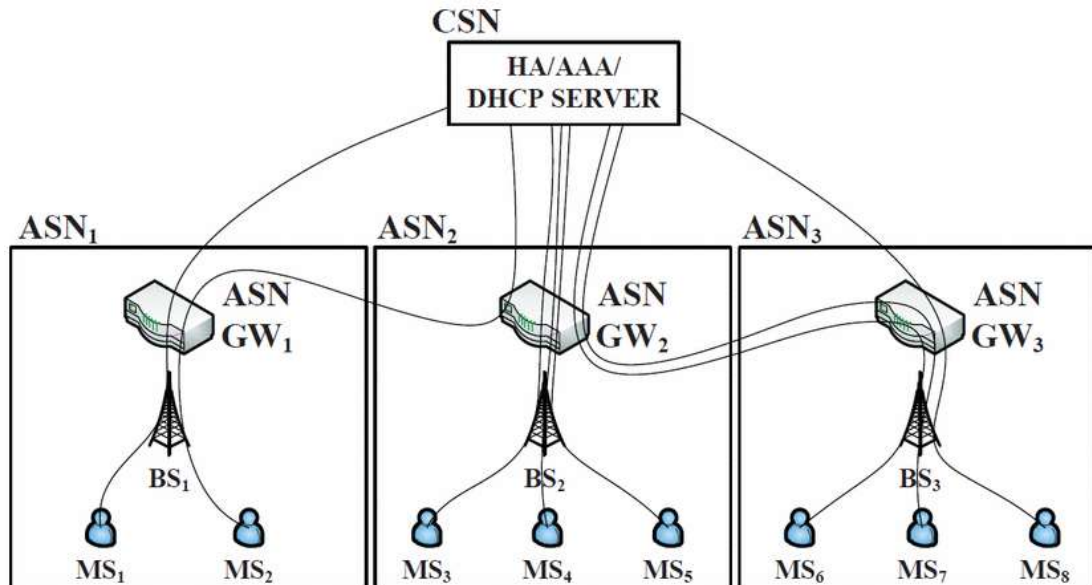


Figura 2. 5: Ejemplo de una red WiMAX con tres ASN-GW.
Fuente: (Yang et al., 2010)

2.4.3. Red de servicios de conectividad (CSN).

La CSN proporciona conectividad a: internet, ASP, otras redes públicas y redes corporativas. El CSN es propiedad del NSP e incluye servidores AAA que admiten la autenticación de los dispositivos, usuarios y servicios específicos. La CSN también proporciona a los usuarios la gestión de políticas de QoS, movilidad y roaming entre ASNs. Además, la CSN puede proveer puertas de enlaces e interconectividad con otras redes, tales como, redes de telefonía pública conmutada (Public Switched Telephone Network, PSTN), 3GPP y 3GPP2.

El modelo de referencia de la red WIMAX (véase la figura 2.6) define puntos de referencia entre ellos: (1) MS y el ASN, llamado R1, que además de la interfaz aérea incluye protocolo en el plano de gestión, (2) MS y CSN, llamado R2, que proporciona autenticación, autorización de servicio, configuración IP y gestión de la movilidad, (3) ASN y CSN, denominadas R3, para apoyar la aplicación de políticas y movilidad, (4) ASN y ASN, llamadas

R4, para apoyar la movilidad inter-ASN, (5) CSN y CSN, llamado R5, para apoyar la itinerancia a través de múltiples NSPs, mientras que en la figura 2.7 se muestra procesos adicionales con modelo de referencia de ASN, tal como (6) BS y ASN-GW, denominado R6, que consiste en rutas portadoras intra-ASN y túneles IP para movilidad, y (7) BS a BS, llamado R7, para facilitar un traspaso.

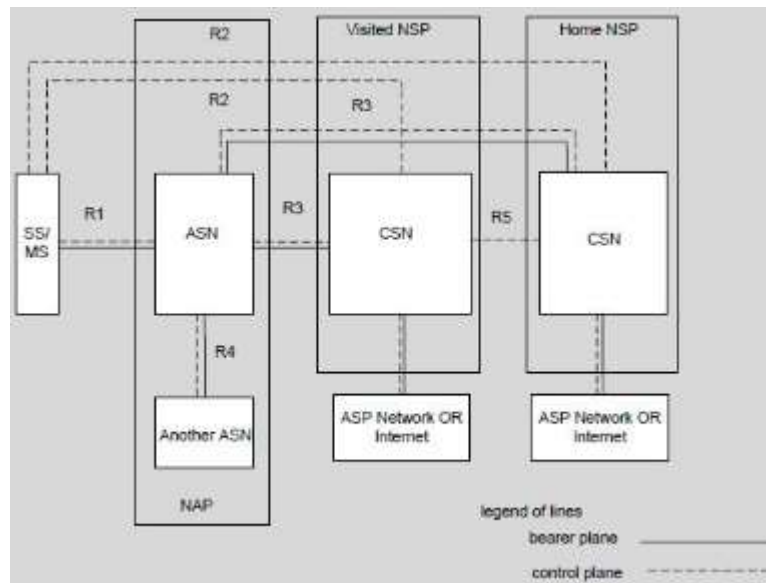


Figura 2. 6: Modelo de referencia de una red WiMAX.
Fuente: (Ahmadi, 2011)

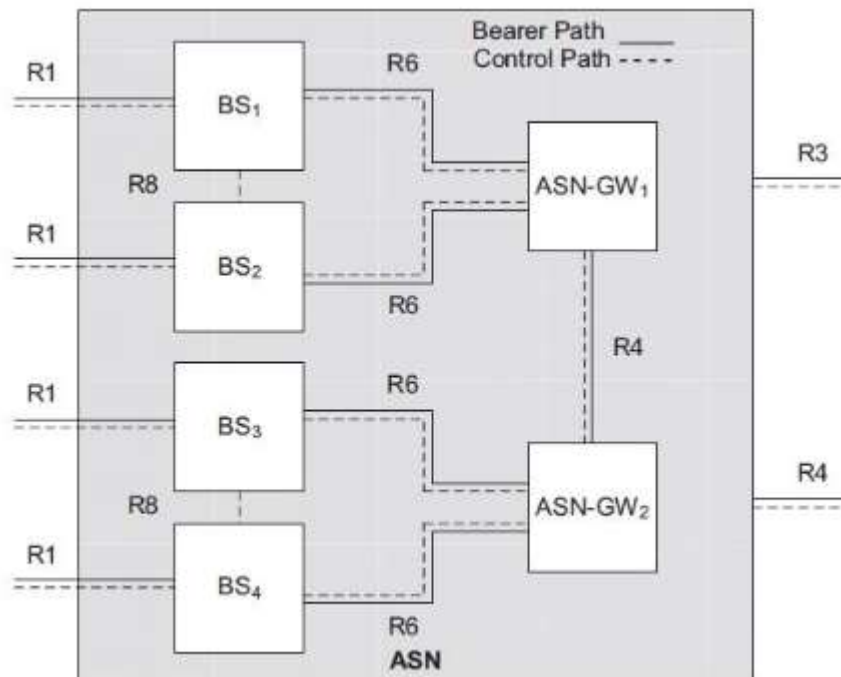


Figura 2. 7: Modelo de referencia de la red WiMAX con ASN.
Fuente: (Ahmadi, 2011)

La figura 2.8 muestra una distribución simplificada de la funcionalidad WiMAX de las entidades. La MS/SS y ASN están conectados a través del punto de referencia R1, y el punto de referencia R3 está conectado entre el ASN y CSN. Los puntos de referencia R1, R3 y R6 llevan el control y la gestión para admitir la gestión de búsqueda/sesión, seguridad, calidad de servicio, AAA y transportar los datos de usuario de MS/SS a Internet a través de ASN y CSN. (Bao, 2015)

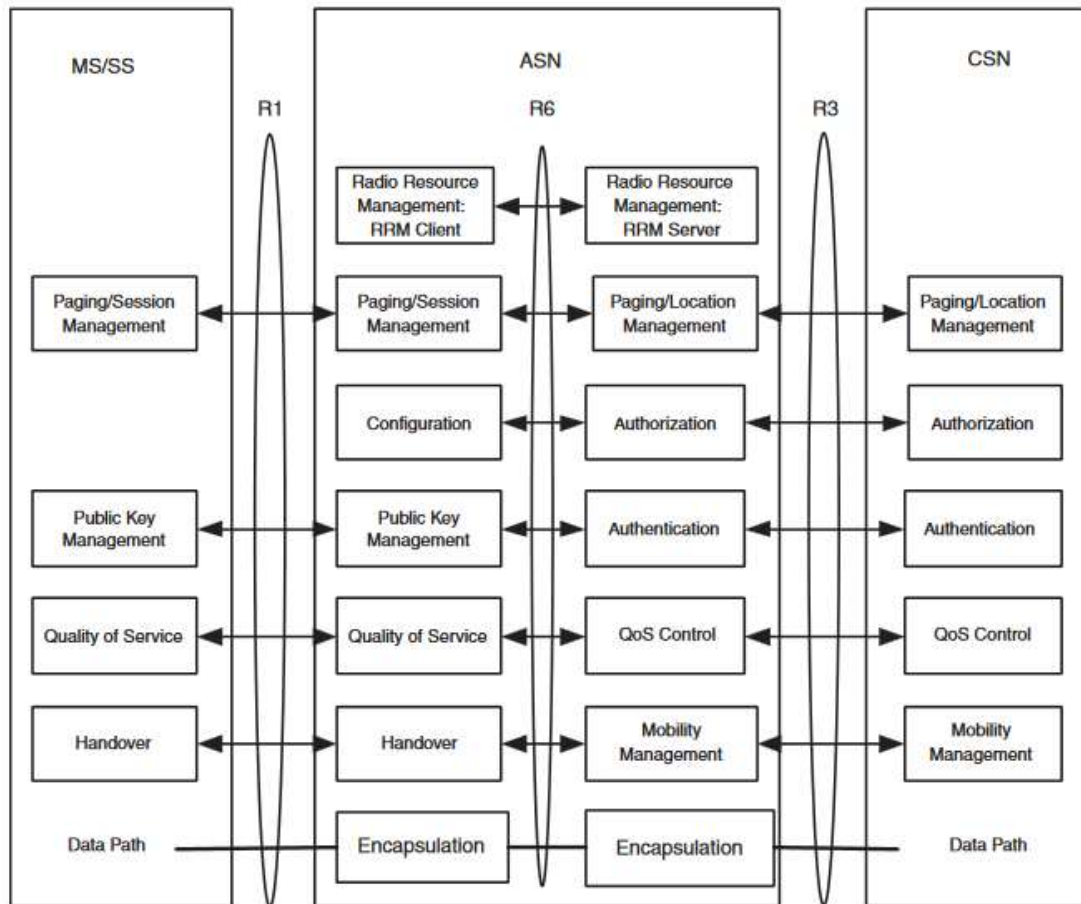


Figura 2. 8: Modelo de funciones realizadas en puntos de referencia.

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

2.5. Funcionamiento de una red WiMAX.

Las redes WiMAX utilizan un enfoque similar al de los teléfonos celulares, por ejemplo, 4G-LTE. La cobertura de un área geográfica se divide en una serie de áreas superpuestas llamadas células o celdas. Cada celda proporciona cobertura para los usuarios dentro de esa vecindad inmediata. Cuando el abonado viaja de una celda a otra, la conexión inalámbrica también ocurre de una celda a otra.

Generalmente, un sistema WiMAX consta de dos partes, que son:

- a. **Estación Base (BS)**, similar en concepto a una torre de telefonía celular (una torre WiMAX puede proporcionar cobertura en un área muy grande) tan grande como 8000 km². Este se encuentra ubicado en lo alto de una torre o edificio para emitir la señal inalámbrica.
- b. **Dispositivo de abonado WiMAX**, estos podrían ser WiMAX portátil, dispositivo de internet (MID), o incluso un modem WiMAX utilizado por el suscriptor para recibir las señales.

El usuario paga al proveedor de servicios por el acceso inalámbrico a internet, tal como se hace para una conexión a internet normal a través de una red cableada. El proveedor de servicios proporciona al usuario final el software, un inicio de sesión y una contraseña. La mayoría de los fabricantes de portátiles hoy equipan modelos de alta gama con una antena incorporada junto con el software necesario para que la unidad sea compatible con WiMAX.

Los proveedores de servicios transmiten las señales de internet desde la estación base. La antena en el usuario recibe las señales, proporcionando internet ininterrumpido mientras él está disponible. Con un ordenador portátil equipado con una antena podría ser conectado a internet donde quiera que la señal esté disponible desde la estación base. Al igual que con la estación móvil que captura una señal de la torre más cercana de la proveedora de servicios, lo mismo ocurre con los servicios WiMAX de nueva generación.

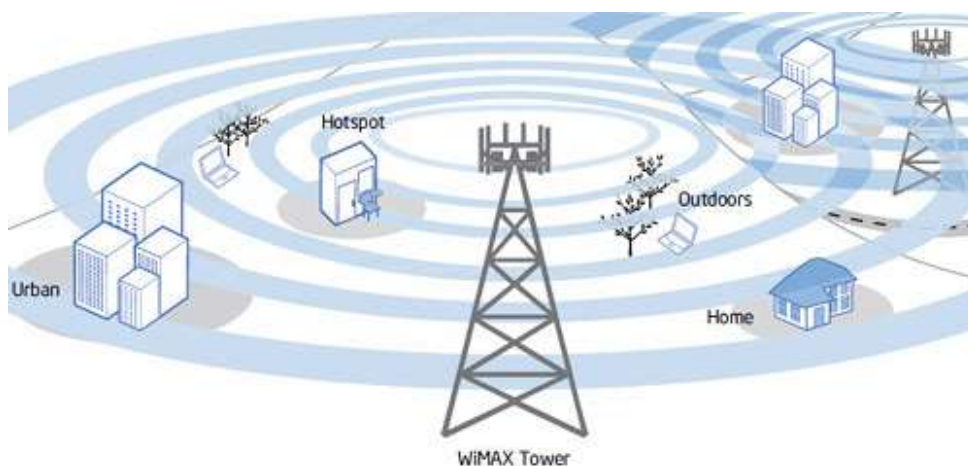


Figura 2. 9: Funcionalidad de WiMAX entre una BS y usuarios.

Fuente: (Williams, 2004)

Por ejemplo, una base WiMAX puede enviar señales a distancias de varios kilómetros dependiendo del terreno, tal como se muestra en la figura 2.9. Cuanto más plano es el terreno, mas es la cobertura. Si el usuario final se traslada de una estación a otra, su receptor portátil se conectará a la otra base (del mismo proveedor de servicios) con una señal más fuerte.

Para despliegues de WiMAX fijos, los proveedores de servicios suministran equipos locales del cliente (*Customer Premises Equipment, CPE*) que actúa como un “modem” inalámbrico para proporcionar la interfaz a la WiMAX para una ubicación específica, como una casa, un café u oficina, tal como se muestra en la figura 2.10. WiMAX es también bien adecuado para los mercados emergentes como una forma rentable de ofrecer soluciones de alta calidad, internet de alta velocidad

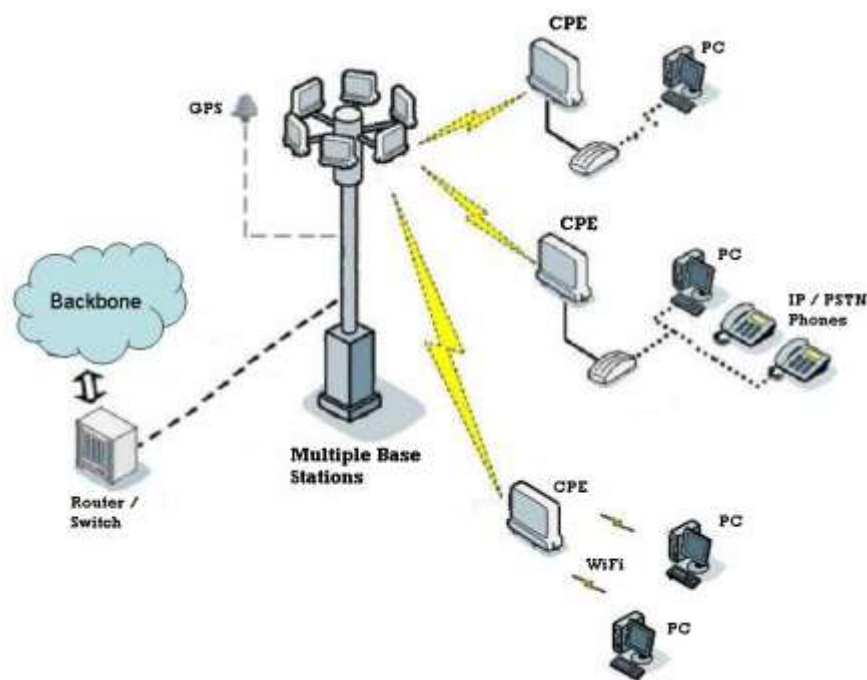


Figura 2. 10: Despliegue de WiMAX a CPEs.
Fuente: (Hosseini & Shayan, 2010)

2.6. Seguridad en redes WiMAX.

WiMAX fue desarrollado después de las fallas de seguridad que plagaron las primeras redes inalámbricas basados en el estándar IEEE 802.11. Reconociendo la importancia de la seguridad, los grupos de trabajo 802.16 diseñaron varios mecanismos para proteger al proveedor de servicios contra robo de servicio y para proteger al cliente de información no autorizada.

La norma incluye métodos de última generación para garantizar la privacidad de los datos de los usuarios y prevenir el acceso no autorizado, con optimización adicional del protocolo para movilidad. Una sub-capas de privacidad dentro de WiMAX MAC maneja la seguridad. La clave de los aspectos de seguridad WIMAX son los siguientes:

- a. **El apoyo a la privacidad:** los datos del usuario son cifrados mediante esquemas criptográficos de robustez aprobada para proporcionar privacidad, ya sea para el estándar de cifrado avanzado (*Advanced Encryption Standard, AES*) y el estándar de triple cifrado de datos (*Triple Data Encryption Standard, 3DES*). La mayoría de sistemas de estas implementaciones seguramente utilizan AES, ya que es el nuevo estándar de cifrado aprobado como compatible con los Estándares Federales de Procesamiento de la Información (*Federal Information Processing Standards, FIPS*) y es más sencillo de implementar.
- b. **Autenticación/Dispositivo de usuario:** WiMAX proporciona un medio flexible para autenticación de estaciones de abonado y usuarios para prevenir el uso no autorizado. Este está basado en el protocolo de autenticación extensible (*Extensible Authentication Protocol, EAP*) del Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet (*Internet Engineering Task Force, IETF*) que soporta una variedad de credenciales, como nombre de usuario/contraseña, certificados digitales que contienen su clave pública y dirección MAC. Los operadores de WiMAX pueden usar los certificados para la autenticación del dispositivo con nombre de usuario/contraseña, así como también por medio de una tarjeta inteligente.
- c. **Protocolo de gestión de claves flexibles:** el protocolo de administración de claves version 2 (*Protocol Key Management v2, PKMv2*) se utiliza para transferir de forma segura el material de la estación base a la estación móvil, reautorizando y refrescando periódicamente las claves. PKM es un protocolo cliente-servidor, donde la MS actúa como el cliente; la BS, como servidor. PKM utiliza certificados digitales X.509 y sistemas criptográficos de clave pública (*Rivest-Shamer-Adleman, RSA*) con algoritmos de cifrado de clave pública para realizar intercambios de BS y el MS.

- d. Protección de los mensajes de control:** el uso de esquemas de resumen de mensajes, tales como código de autenticación de mensajes basado en cifrado (Cipher-based Message Authentication Code, CMAC) basada en AES o código de autenticación de mensajes en clave-hash (Hash-based Message Authentication Code, HMAC) basado en MD5, que protegen la integridad de los mensajes de control transmitidos por aire.
- e. Soporte para transferencias rápidas:** para soportar transferencias rápidas, WiMAX permite a los EM utilizar pre-autenticación con un BS particular para facilitar la entrada acelerada. Un esquema de enlace de tres vías es compatible para optimizar los mecanismos de autenticación y apoyar en transferencias rápidas, mientras que simultáneamente previene los ataques.

2.7. Arquitectura de red LTE.

A partir de esta sección, se describirá la arquitectura básica de la red LTE. LTE (acrónimo de *Long Term Evolution*) tiene una simplificación general de la arquitectura en comparación con los sistemas más antiguos, que promovieron la evolución hacia un nuevo sistema simple y más eficaz. LTE tiene como objetivo la optimización de los servicios de paquetes conmutados en general, mejorar el rendimiento requerido para mayores velocidades de bits al usuario final y mejorar los retardos de entrega de paquetes. LTE fue considerado para la optimización de trabajar con otras plataformas, tales como diferentes accesos de redes 3GPP.

Por ejemplo, el acceso de radio terrestre universal evolucionado (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network, E-UTRAN*) se utiliza a nivel de estación base, el cual consiste en estaciones bases inteligentes llamado Nodo B evolucionado (eNode B). Es decir, que E-UTRAN corresponde a una sencilla red de eNode B interconectados por la interfaz X2. En la figura 2.11 se muestra la arquitectura básica de la red cuando se utiliza E-UTRAN. Existen cuatro principales capas de dominio: **(1)** Equipo de Usuario (*User Equipment, UE*), **(2)** E-UTRAN, **(3)** Núcleo de Paquetes Evolucionado (*Evolved Packet Core, EPC*), y **(4)** servicios.

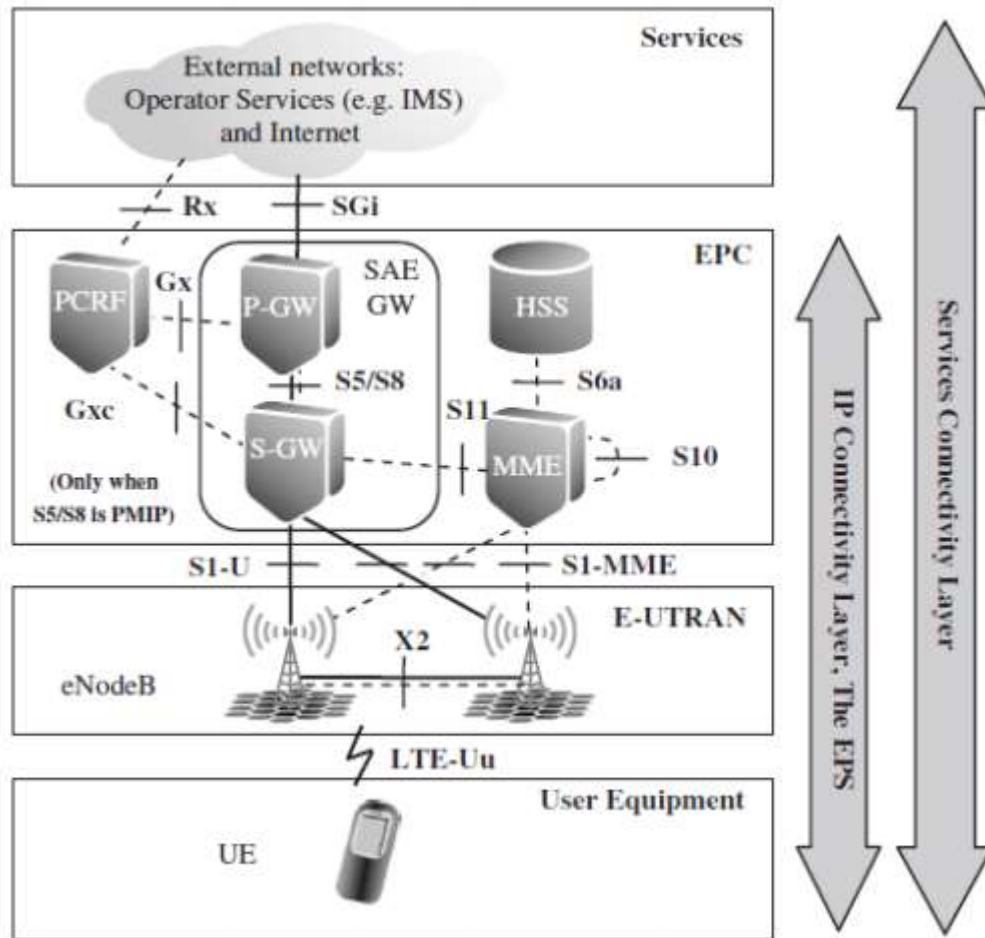


Figura 2. 11: Arquitectura básica de LTE utilizando E-UTRAN.
Fuente: Monserrate C., R. J. (2017).

Los tres primeros forman la capa de conectividad de protocolo de internet o sistema de paquetes evolucionado (*Evolved Packet System, EPS*) con el propósito de proporcionar conectividad basada en IP, altamente optimizado, ofreciendo todos los servicios sobre IP, eliminando la necesidad de nodos de conmutación de circuitos e interfaces presentes en los sistemas 3GPP.

Los UEs normalmente se hacen referencia al terminal, ya sea como móvil o equipo terminal, que interactúan con los eNode Bs via interfaz LTE-Uu (en la figura 2.12 se muestra el funcionamiento de la interfaz LTE-Uu). Mientras que, EPC contiene los siguientes elementos:

(1) Entidad de Gestión de la Movilidad (*Mobility Management Entity, MME*), responsables de la seguridad y autenticación, gestión de la movilidad, y suscripción de la administración de perfiles y conectividad;

(2) Puerta de Servicio (Serving GateWay, S-GW), responsables de la gestión de túneles UP y conmutación;

(3) Paquete de datos de puerta de enlace de red (*Packet Data Network GateWay, P-GW*), responsables de la realización de funciones de activación periódica del tráfico y de filtrado, y por lo general actúa como la IP de puerta de enlace para el UE;

(4) Función de recurso de política y carga (*Policy and Charging Resource Function, PCRF*), responsable de la política y carga de control (PCC), la toma de decisiones sobre cómo manejar los servicios en términos de calidad y servicio; y por último,

(5) Servidor de suscripción a hogares (*Home Subscription Server, HSS*), que es repositorio de datos de suscripción para todos los usuarios permanentes.

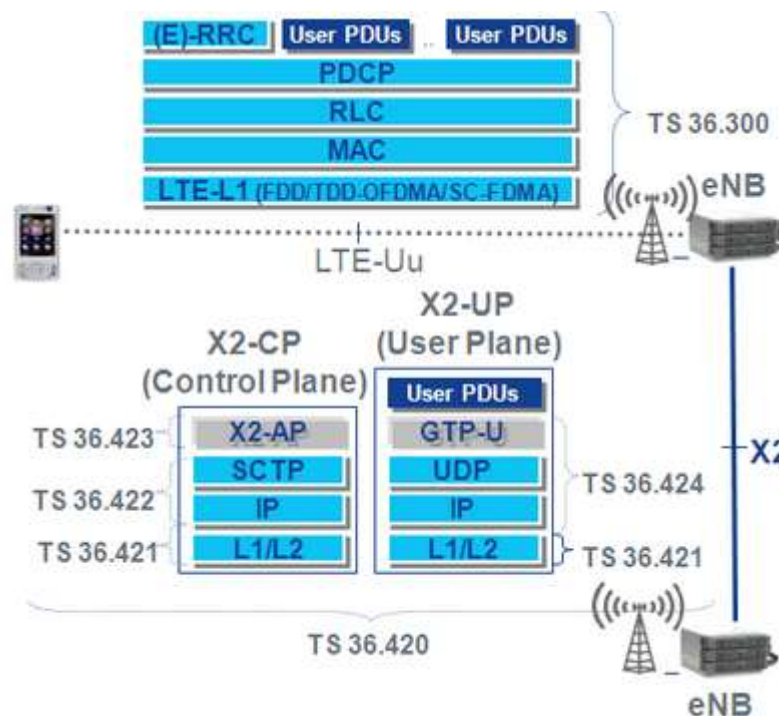


Figura 2. 12: Funcionalidad de la interfaz LTE-Uu.

Fuente: (Prasetyo, 2015)

Todas las comunicaciones entre EPC y E-UTRAN se llevan a cabo por la interfaz S1. Cuando existe una conexión de un eNodo B a MME, la interfaz se llama S1-MME y en caso de darse entre eNodo B y S-GW es S1-U. Un escenario de implementación alternativa es combinar S-GW y P-GW en un sistema de elemento llamado “Evolución de la arquitectura de servicios de

puerta de enlace (*Service Architecture Evolution GateWay, SAE-GW*), tal como se observa en la figura 2.11, pero las normas se definen en la interfaz entre ellos, y todas las operaciones también se han especificado para cuando están separados.

El dominio de servicios, junto con EPC, E-UTRAN y el UE forman la capa de servicios de conectividad. Este dominio consiste en varios tipos de subsistemas, que pueden contener varios nodos lógicos. Desde el punto de vista arquitectónico, su estructura se mantiene intacta en comparación con sistemas 3GPP anteriores, pero la evolución funcional también ha seguido en esas áreas. Una imagen diferente de la arquitectura de red de LTE se muestra en la figura 2.13

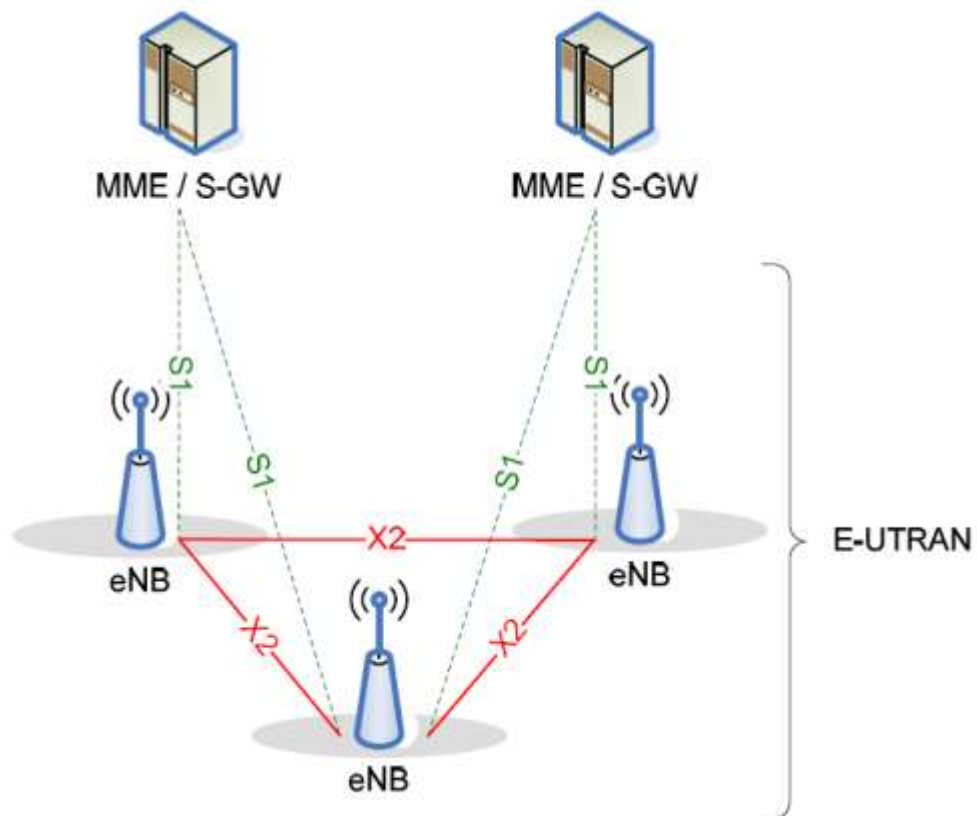


Figura 2. 13: Otro tipo de arquitectura de LTE.
Fuente: (Prasetyo, 2015)

2.8. Interfaz de radio.

Esta sección se describe la interfaz de radio de LTE basado en información disponible por ETSI, (2009) y del libro publicado por (Holma & Toskala, 2009). El enfoque utilizado en técnicas de acceso de LTE consiste

en utilizar el acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA*) para enlaces descendentes (*DownLoad, DL*) y el acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única (*Single Carrier-Frequency Division Multiple Access, SC-FDMA*) para enlaces ascendentes (*UpLoad, UL*), ambos con prefijo cíclico (*Cyclic Prefix, CP*). CP es un prefijo sencillo añadido a OFDM, copiado desde el extremo del mismo símbolo.

La señal tendrá una naturaleza periódica, lo que permite las operaciones de Fourier discretas, por lo tanto, evitando interferencias por símbolo, el uso de CP se aborda en la estructura de la trama más adelante. En un sistema OFDM, el ancho de banda disponible se divide en varias sub-portadoras que pueden ser modulados independientemente. La razón principal que justifica las diferentes técnicas de acceso para el UL y DL es el hecho de que SC-FDMA optimiza el rango y consumo de energía en la UE, mientras que OFDMA minimiza la complejidad del receptor y permite la programación de dominio de la frecuencia con la flexibilidad en la asignación de recursos.

OFDMA es un esquema multi-portadora de transmisión en oposición a SC-FDMA. Ambos permiten el acceso de múltiples usuarios, en función del ancho de banda disponible, asignando dinámicamente cada usuario a un recurso de tiempo-frecuencia específica, dependiendo de duplexación que se despliega. OFDM requiere un gran rango dinámico debido a la alta relación de potencia pico a promedio (*Peak to Average Power Ratio, PAPR*). Como SC-FDMA es OFDM con precodificación, el uso de SC-FDMA revela una optimización de 2 dB de PAPR en comparación con OFDMA.

La principal diferencia entre un sistema OFDM y OFDMA es representada en la figura 2.14. La diferencia de colores representa a usuarios utilizando recursos. En OFDM, los usuarios se asignan a los recursos en el dominio del tiempo solamente, mientras que en OFDMA, los usuarios pueden asignar también en el dominio de la frecuencia, optimizar el uso de recursos. Esta asignación de recursos se realiza mediante el uso de un sistema de bloque de recursos (*Resource Block, RB*) que se explicará más adelante.

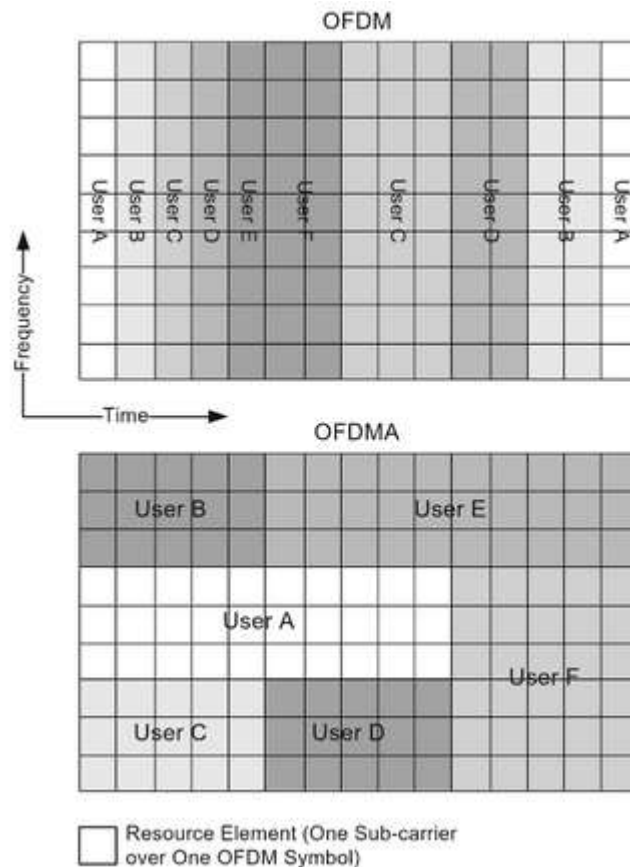


Figura 2. 14: Diferencias entre OFDM y OFDMA.
Fuente: (Ahmadi, 2011)

Existen dos tipos de duplexación, **(1)** Duplexación por División de Frecuencia (*Frequency Division Duplexing, FDD*), **(2)** Duplexación por División de Tiempo (*Time Division Duplexing, TDD*) ambas compatibles con LTE, aunque FDD es la técnica más adoptada en la mayoría de las redes. En cuanto a los canales físicos, solo hay dos tipos de estructuras de trama: **(1)** tipo 1, aplicable a FDD; y, **(2)** tipo 2, aplicable a FDD. Cada trama de radio tiene una duración de 10 ms y la descripción específica de la estructura de tipo 1 de la trama se presenta más adelante.

Las especificaciones 3GPP indican que hay 17 bandas de frecuencia FDD y 8 TDD únicas. En cuanto a ancho de banda de transmisión, LTE tiene algunas opciones cuando se trata de canalizar la selección del ancho de banda, incluyendo canales seleccionables que van desde 1,4 hasta 20 MHz, con una separación de subportadora de 15 kHz. Cuando el servicio de multidifusión de transmisión multimedia evolucionado (Evolved Multimedia

Broadcast Multicast Service, eMBMS) se encuentra activada, una subportadora de separación de 7,5 kHz está disponible. En la tabla 2.3 se muestran cada uno de los anchos de banda disponibles de LTE son discriminadas en términos del tamaño del RB. Por ejemplo, un ancho de banda más grande tendrá más RBs disponibles.

Tabla 2. 3: Resumen de los anchos de banda disponible en LTE.

Frequency Bands	450 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2.1 GHz and 2.6 GHz					
Channel bandwidth	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
1 RB = 180 kHz	6 RB	15 RB	25 RB	50 RB	75 RB	100 RB
Modulation Schemes	Downlink: QPSK, 16QAM, 64QAM Uplink: QPSK, 16QAM, 64QAM (optional for handset)					
Multiple Access	Downlink: OFDMA Uplink: SC-FDMA					
MIMO technology	Downlink: Wide choice of MIMO configuration options for transmit diversity, spatial multiplexing, and cyclic delay diversity (max. 4 antennas at base station and handset) Uplink: Multi user collaborative MIMO					
Peak Data Rate	Downlink: 150 Mbps (UE category 4, 2x2 MIMO, 20 MHz) 300 Mbps (UE category 5, 4x4 MIMO, 20 MHz) Uplink: 75 Mbps (20 MHz)					

Fuente: (Castillo C., D. O., 2017).

LTE utiliza esquemas de modulación QPSK, 16-QAM y 64-QAM. Al igual que otros sistemas, como 3GPP. También, LTE trabaja con la modulación y codificación adaptativas (*Adaptive Modulation Coding, AMC*), que mejoran en gran medida el rendimiento de datos. La variación de la modulación del esquema de codificación del enlace descendente, basándose en la condición de canal para cada usuario, dan como resultado en una de las características más importantes de LTE, que sería la auto-optimización. También, tiene la capacidad de modificar el esquema de modulación a una de orden superior (más bits por símbolo) cuando la condición de enlace es buena, entonces la capacidad de la red aumenta.

Los datos del usuario, control e información son transportados por canales físicos a las capas superiores. Las señales físicas no se comunican

con capas superiores y se utilizan para fines de búsqueda de celdas y de estimación de canal. En DL los principales canales físicos son el canal de difusión físico (*Physical Broadcast Channel, PBCH*), el control de enlace descendente físico (*Physical Downlink Control CHannel, PDCCH*) y canal compartido de enlace descendente físico (*Physical Downlink Shared CHannel, PDSCH*).

Las principales señales de DL son la señal de referencia (*Reference Signal, RS*), y las señales sincronización primaria (*Primary SynCHronisation, P-SCH*) y secundaria (*Secondary SynCHronisation, S-SCH*). En la figura 2.15 se muestra la estructura de trama de Tipo 1 para DL. Una trama de radio tiene una duración de 10 ms, y se compone de 20 ranuras de 0,5 ms de duración cada uno. Dos de estas ranuras son llamados sub-tramas, con una duración de 1 ms, también designada como la transmisión de intervalo de tiempo (*Transmission Time Interval, TTI*).

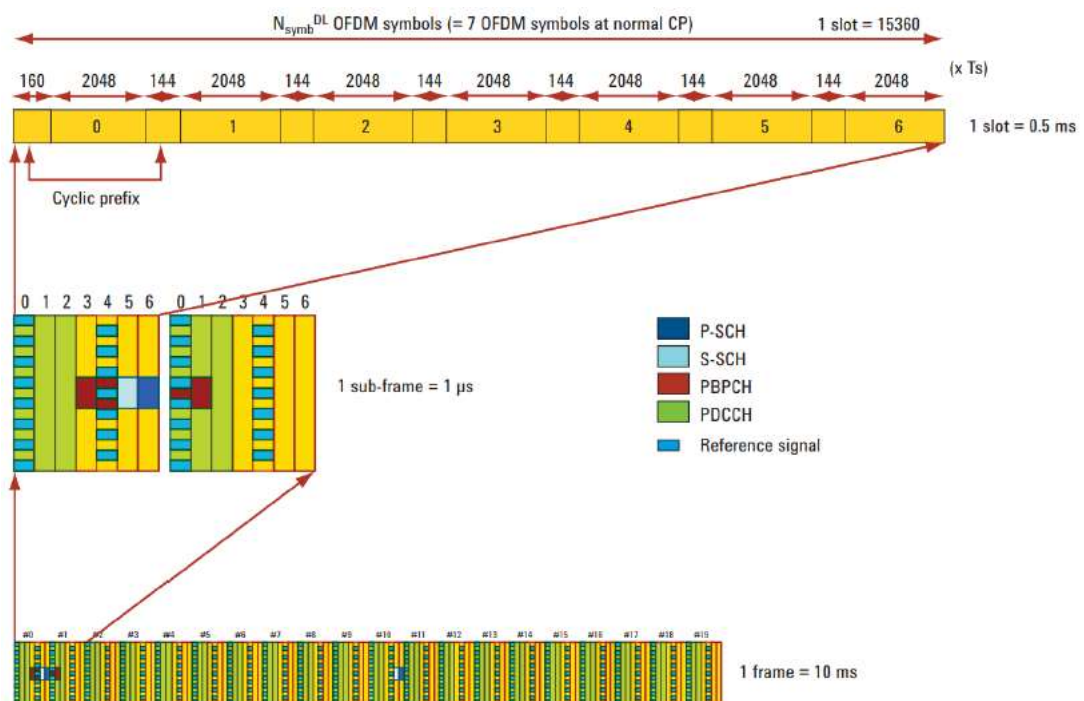


Figura 2. 15: Trama de Tipo 1 para enlaces descendentes.

Fuente: (Ahmadi, 2011)

Los sistemas tienden a evolucionar para TTIs más cortos, lo que reduciría la latencia a costa de un procesador de equipo de usuario más exigente. Se puede observar en la figura 2.15, qué símbolo son utilizados para

las señales físicas y canales, y también el uso de CP en la trama y el espacio de datos predominante representado en amarillo. Aunque, ya fue especificado RS, P-SCH y S-SCH éstas tres forman parte del mapeo físico de las señales físicas DL en la estructura de trama tipo 1. A continuación, se describe brevemente el mapeo físico según la figura 2.15:

- a) RS, que se transmite en los símbolos OFDM 0 y 4 de cada ranura. Esto depende del número de puerto de la antena;
- b) P-SCH, que se transmite en el símbolo 6 de las ranuras 0 y 10 de cada trama de radio;
- c) S-SCH, que se transmite en el símbolo 5 de las ranuras 0 y 10 de cada trama de radio;
- d) Canal físico PBCH, que se transmite en 72 subportadoras centradas alrededor de la subportadora DC.

Mientras, que para UL los principales canales físicos son: el canal físico de control del enlace ascendente (*Physical Uplink Control Channel, PUCCH*) y el canal físico compartido del enlace ascendente (*Physical Uplink Shared Channel, PUSCH*). Las principales señales físicas de UL son: señales de referencia de demodulación y canal físico de acceso aleatorio (*Physical Random Access Channel, PRACH*). En cuanto a la estructura de UL, el Tipo 1 básicamente es el mismo que DL cuando se trata de sus longitudes (tramas, ranuras y subtramas). CP tendrá un impacto directo en el número de símbolos que formará una ranura o slot. En una estructura de trama de Tipo 1 para UL, una ranura se compone de 7 símbolos, siendo el cuarto símbolo una señal de referencia utilizado para propósitos de demodulación.

La asignación de recursos en DL se hace con la ayuda de una rejilla de recursos compuesto de varios RBs. Al asignar unidades de recursos de tiempo-frecuencia, la unidad más pequeña posible se denomina un elemento de recurso, que es un símbolo en una subportadora. La agregación de 12 subportadoras contiguas (en referencia a dominio de frecuencia, 12 subportadoras por 15 kHz de espaciado) y una ranura de tiempo (en referencia a dominio de tiempo, 12 subportadoras por 7 símbolos), una tiene un RB. Un

RB se compone de 84 elementos de recursos y este tamaño es el mismo para todo el ancho de banda de transmisión.

El RB es la unidad básica en la asignación de los datos de la UE. En la figura 2.16 se representa esta descripción de la relación entre un RB y frecuencia. Se obtiene una mayor optimización de la interfaz de radio en todo el uso de múltiple-entrada y Multiple-salida (MIMO); permitiendo múltiples operaciones con multiplexación espacial, los datos de usuario y rendimiento se incrementa.

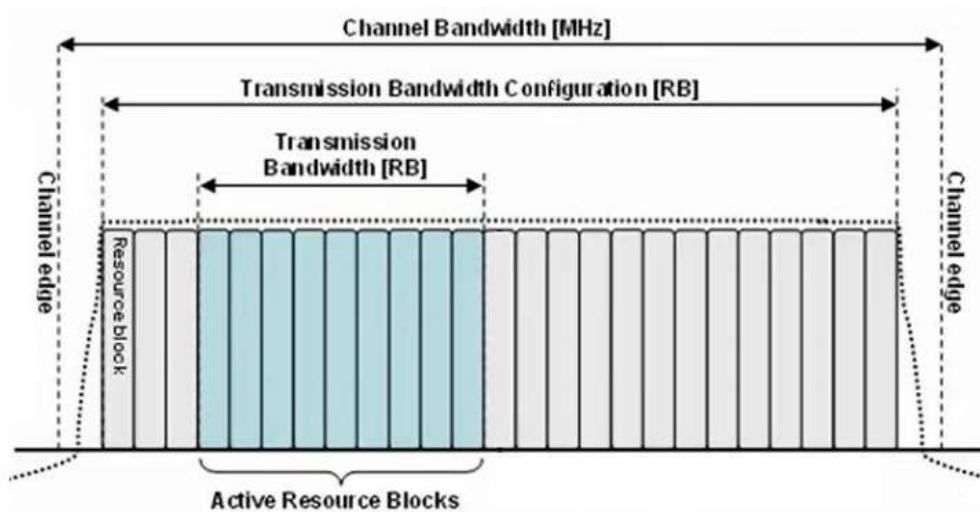


Figura 2. 16: Relación entre un bloque de recursos y frecuencia.
Fuente: Castillo C., D. O. (2017).

2.9. Escalabilidad del ancho de banda en LTE.

El sistema de la red LTE opera en la banda convencional de 2 GHz, así como en las bandas extendidas de 2.6 GHz y 900 MHz. La red LTE debe proporcionar una utilización flexible del ancho de banda, son posibles diferentes anchuras de banda del operador, que van desde 1.25 MHz a 20 MHz (más específicamente: 1.25 MHz, 2.5 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz). El espaciado de la subportadora sigue siendo el mismo para todas las opciones anteriores a 15 KHz, es el número de subportadoras que cambia (revisar la tabla 2.3).

2.10. Capacidad y cobertura.

La velocidad de datos resultante para un usuario particular dependerá de la cantidad de bloques de recursos asignados, la modulación aplicada, la

tasa de codificación del canal, si se utiliza MIMO o no y la configuración, cantidad de sobrecarga, incluyendo si se usa prefijo cíclico largo o corto. Las tasas de datos de bits pico para DL se pueden calcular por:

$$R_B [Mbps] = \frac{bits}{Hz} \times N_S \times \frac{N_{SF}}{T_{SF}}$$

Donde,

N_{SF} , es el número de símbolos por subtramas;

T_{SF} , es el período de subtramas

El logro de las tasas de bits pico de DL se muestra en la tabla 2.4. La modulación QPSK lleva 2 bits por símbolo, mientras que, las modulaciones 16 QAM y 64 QAM de 4 y 6 bits por símbolo. Por ejemplo, MIMO 2x2 duplica aún más la tasa de bits máxima. Por lo tanto, la codificación de tasa 1/2 QPSK lleva 1bps/Hz, y 64QAM sin ninguna codificación y con MIMO 2x2 lleva 12 bps/Hz.

El ancho de banda se incluye en el cálculo tomando el número correspondiente de subportadoras para cada opción, 72 por 1,4 MHz de ancho de banda y 180 por 3,0 MHz de ancho de banda. Para los anchos de banda de 5, 10 y 20 MHz, se supone que 300, 600 y 1200 subportadoras respectivamente. Se supone 13 símbolos de datos por subtrama de 1 ms. La tasa de datos teóricos más alta es de aproximadamente 170 Mbps.

En la tabla 2.4 se muestran las tasas de datos pico alcanzadas utilizando UL. Las velocidades máximas de datos son más bajas en UL que en DL, debido a que el único usuario MIMO no está especificado en UL. MIMO también se puede utilizar en UL para aumentar las velocidades de datos de las celdas, y no las tasas de datos pico de un solo usuario. En la figura 2.17 se muestra cómo los valores máximos de rendimiento del sistema dependen del radio de la celda. Se puede ver que con LTE para los mismos radios se pueden lograr mayores rendimientos que en HSDPA. Para el radio más bajo, se nota un aumento de 125% en el rendimiento y, a medida que el radio aumenta, LTE supera el rendimiento de HSDPA hasta en un 300%.

Tabla 2. 4: Velocidades pico de bits para DL en LTE.

Modulation Coding		Peak bit rate per sub-carrier/bandwidth combination [Mbps]				
		72/1.4 MHz	180/3.0 MHz	300/5.0 MHz	600/10 MHz	1200/20 MHz
QPSK ½	Single Stream	0.9	2.2	3.6	7.2	14.4
16QAM ½	Single Stream	1.7	4.3	7.2	14.4	28.8
16QAM ¾	Single Stream	2.6	6.5	10.8	21.6	43.2
64QAM ¾	Single Stream	3.9	9.7	16.2	32.4	64.8
64QAM 4/4	Single Stream	5.2	13.0	21.6	43.2	86.4
64QAM ¾	2x2 MIMO	7.8	19.4	32.4	64.8	129.6
64QAM 4/4	2x2 MIMO	10.4	25.9	43.2	86.4	172.8

Fuente: (Ahmadi, 2011)

Tabla 2. 5: Velocidades pico de bits para UL en LTE.

Modulation Coding		Peak bit rate per sub-carrier/bandwidth combination [Mbps]				
		72/1.4 MHz	180/3.0 MHz	300/5.0 MHz	600/10 MHz	1200/20 MHz
QPSK ½	Single Stream	0.9	2.2	3.6	7.2	14.4
16QAM ½	Single Stream	1.7	4.3	7.2	14.4	28.8
16QAM ¾	Single Stream	2.6	6.5	10.8	21.6	43.2
16QAM 4/4	Single Stream	3.5	8.6	14.4	28.8	57.6
64QAM ¾	Single Stream	3.9	9.0	16.2	32.4	64.8
64QAM 4/4	Single Stream	5.2	13.0	21.6	43.2	86.4

Fuente: (Ahmadi, 2011)

Capítulo 3: Análisis Comparativo entre WiMAX y LTE.

3.1. Introducción del análisis comparativo.

Las tecnologías de acceso múltiple utilizadas por WiMAX y LTE son bastante similares y tienen modificaciones en el enlace ascendente. La tecnología de acceso múltiple adoptada en el enlace descendente de LTE y enlace ascendente/enlace descendente de WiMAX es OFDMA, mientras que el enlace ascendente de LTE se basa en SC-FDMA. El beneficio de SC-FDMA en el enlace ascendente es la reducción de la relación de potencia pico-promedio (PAPR).

Adicionalmente, se presentan los resultados de simulación junto con suposiciones subyacentes. En la primera parte, se revisa el enlace ascendente LTE y se realiza las simulaciones a nivel de enlace de la portadora única con ecualización de dominios de frecuencia (*Single Carrier with Frequency Domain Equalization, SC-FDE*) y de SC-FDMA en comparación con OFDM. Se utilizó dos tipos de canales multitrayecto, también se utiliza un canal de ruido blanco gaussiano aditivo (*Additive White Gaussian Noise, AWGN*). Además, la simulación de PAPR se realiza para los sistemas SC-FDMA y OFDMA. Finalmente, se analiza la capacidad del sistema MIMO y se realiza una comparación con SISO.

3.2. Diseño del escenario de simulación del nivel de enlace de SC-FDE.

SC-FDE es una técnica de ecualización de dominio de frecuencia utilizada para minimizar los efectos de desvanecimiento selectivo de frecuencia en el enlace ascendente LTE. SC-FDE tiene una eficiencia espectral similar y un rendimiento de nivel de enlace como OFDM. Sin embargo, tiene ciertas ventajas sobre OFDM debido al uso de la transformada discreta de Fourier (DFT) y de la transformada discreta de Fourier inversa (IDFT) en el receptor. Los diagramas de bloques utilizados en Simulink de MatLab para la simulación de nivel de enlace de SC-FDE y OFDM se muestran en las figuras 3.1 y 3.2, respectivamente. Se puede observar la similitud entre dos diagramas de bloques ya que contienen los mismos bloques de procesamiento de señales.

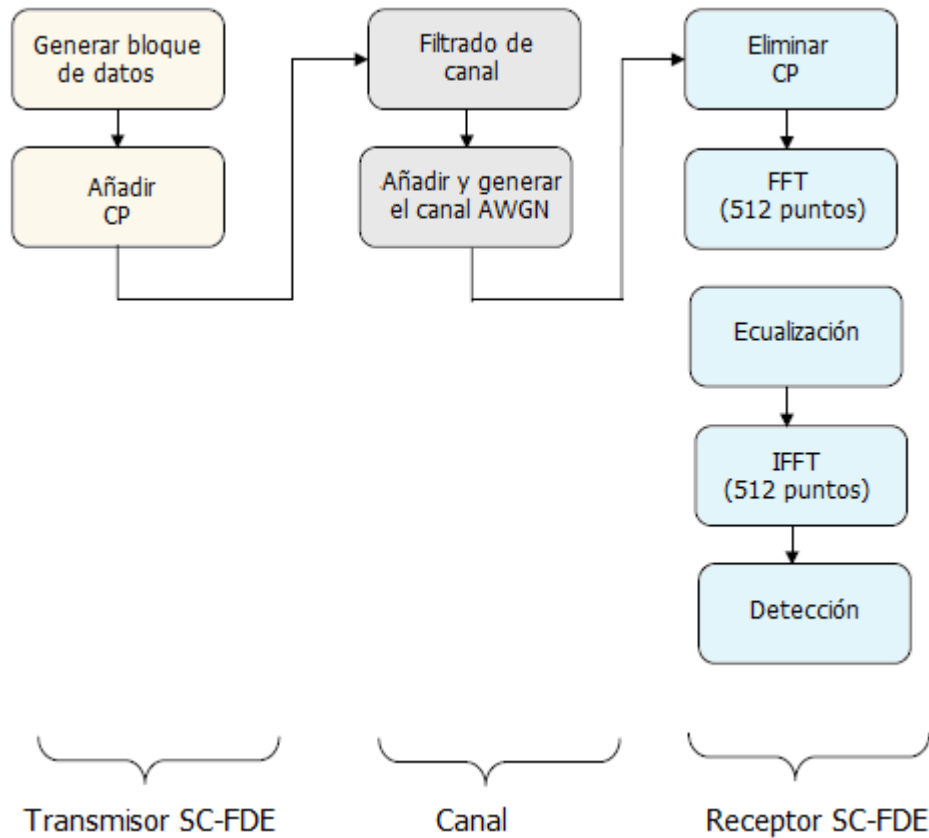


Figura 3. 1: Diseño en Simulink para la simulación del nivel de enlace de SC-FDE.
Elaborado por: Autor.

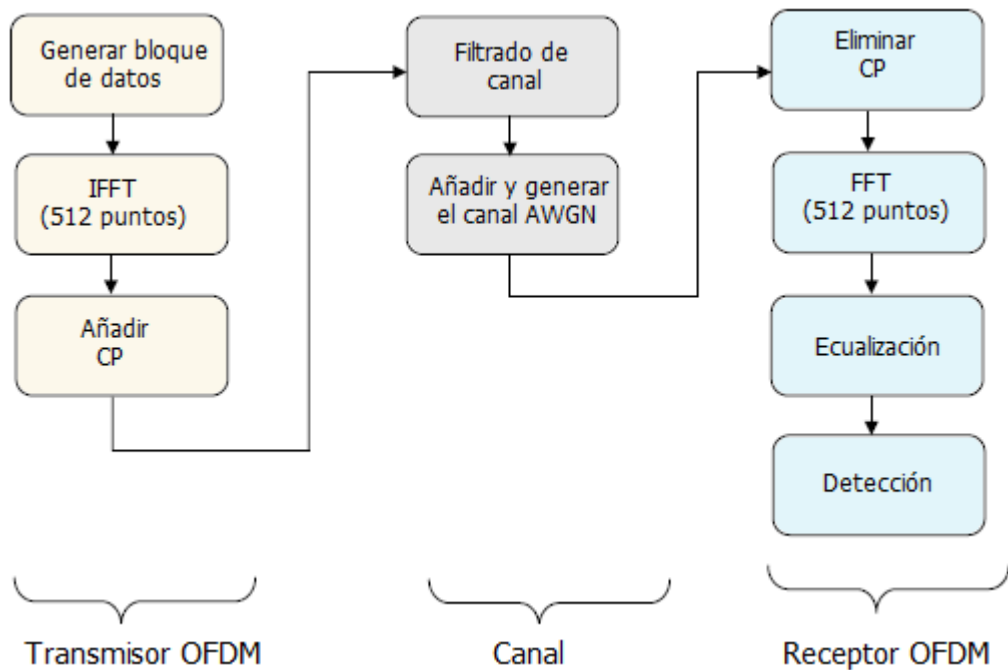


Figura 3. 2: Diseño en Simulink para la simulación del nivel de enlace de OFDM.
Elaborado por: Autor.

A continuación, en la tabla 3.1 se describen los parámetros utilizados en la simulación donde los parámetros se eligen solo para el ancho de banda de transmisión de 5 MHz del sistema LTE. El número de iteraciones usadas en la simulación Monte Carlo es 10^4 . Una simulación Monte Carlo es un método que cuenta repetidamente el número de símbolos transmitidos y errores de símbolos en cada iteración. El formato de modulación utilizado es QPSK y el espacio de subportadora se calcula así:

$$\frac{5 \text{ MHz}}{512} = 9.765 \text{ kHz}$$

Otros parámetros importantes, son los tipos de ecualización y de los canales que se utilizan en el diagrama de bloques de las figuras 3.1 y 3.2. Para el caso de ecualización, se utilizan el estimador de mínimo error cuadrático medio (*Minimum Mean Square Error, MMSE*) y forzamiento cero (*Zero Forcing, ZF*); mientras que, los tipos de canales utilizados en la simulación fueron: canales multitrayecto de tipo peatón (conocido como ITU Pedestrian) y vehicular (conocido como ITU Vehicular).

Tabla 3. 1: Parámetros de simulación.

Parámetros	Valores
Ancho de banda del sistema	5 MHz
Tasa de muestreo	5×10^6 muestras por segundo
Formato de modulación	QPSK
Prefijo cíclico	4×10^{-6} o 20 muestras
Espaciado de la subportadora	9.765 kHz
Tamaño IFFT	512 puntos
Tamaño del bloque de entrada	16 símbolos
Tamaño de entrada FFT	16
Número de iteración	10^4
Ecualización	MMSE y ZF
Canal	Pedestrian, Vehicular y AWGN
Intervalo de confianza	32

Elaborado por: Autor.

Durante la ejecución de las simulaciones (véase las figuras 3.1 y 3.2) los resultados obtenidos calculan la tasa de error del símbolo (SER) para la medición del rendimiento de los sistemas SC-FDE y OFDM en varios escenarios descritos en los parámetros de la tabla 3.1.

3.3. Evaluación de la tasa de error de símbolos para SC-FDE y OFDM utilizando el esquema de ecualización MMSE.

En la presente sección se calcula las métricas de la SER, tanto para los sistemas SC-FDE y OFDM. En la simulación se utilizan los tres tipos de canales descritos en la sección 3.2 en la tabla 3.1 (dos canales multitrayectos y 1 canal AWGN). El esquema de ecualización utilizado para obtener las curvas de la SER es el estimador de mínimo error cuadrático medio.

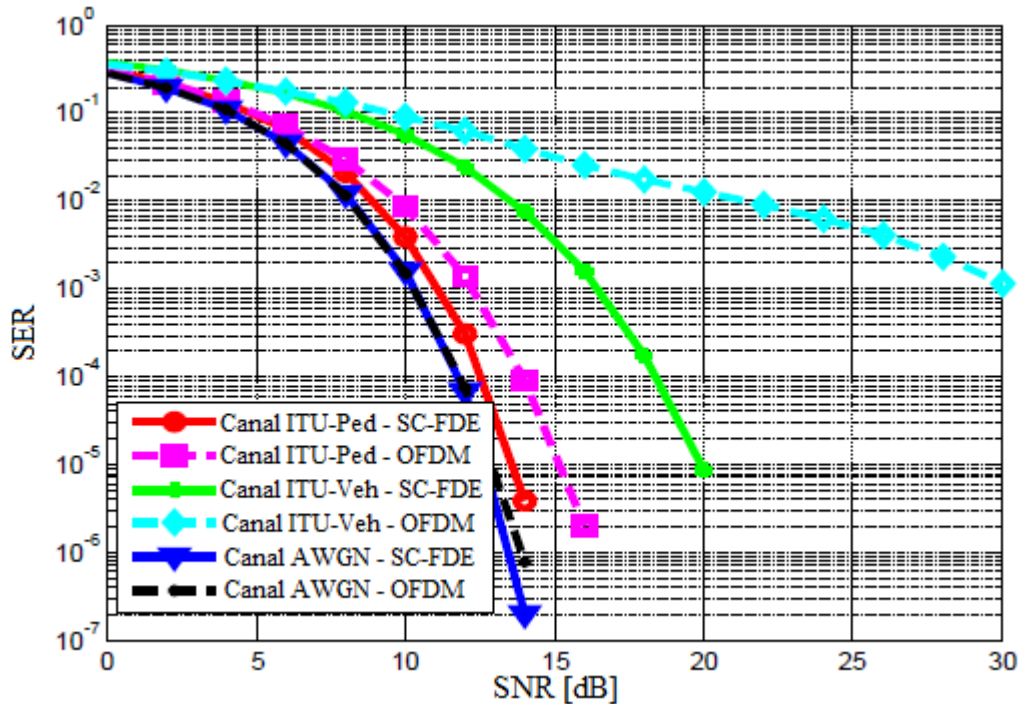


Figura 3. 3: Resultado de métricas de la SER entre sistemas SC-FDE y OFDM usando esquemas de ecualización del estimador MMSE.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.3 muestra los resultados de la simulación, se puede observar que en el caso del canal AWGN, SC-FDE y OFDM tienen un rendimiento de SER similar. Sin embargo, en el caso de los canales ITU-Ped e ITU-Veh, el sistema SC-FDE supera al sistema OFDM. Se sabe, que OFDM necesita una codificación de canal adicional para lograr este rendimiento debido a su naturaleza sensible a la frecuencia de la portadora.

En las tablas 3.2 y 3.3 se muestran el resumen comparativo de los resultados obtenidos en la figura 3.3. La tabla 3.2 muestra claramente que el sistema SC-FDE reduce significativamente la SER en comparación con el sistema OFDM usando los canales ITU Peatonal y Vehicular.

Tabla 3. 2: Cuadro comparativo entre los sistemas SC-FDE y OFDM usando diferentes canales con ecualización MMSE.

	Canales	SNR (dB)	SER
Sistema SC-FDE	AWGN	10	0.00157
	ITU Ped	10	0.00403
	ITU Veh	10	0.058
Sistema OFDM	AWGN	10	0.00157
	ITU Ped	10	0.00863
	ITU Veh	10	0.093

Elaborado por: Autor.

En la tabla 3.3 se observa un resultado importante, es decir, a medida que aumenta la SNR, el SC-FDE reduce drásticamente la tasa de error del símbolo en comparación con el sistema OFDM en el caso de utilizar el canal ITU Vehicular.

Tabla 3. 3: Cuadro comparativo entre los sistemas SC-FDE y OFDM usando el canal ITU Vehicular con ecualización MMSE.

	Canales	SNR (dB)	SER
Sistema SC-FDE	ITU Veh	16	0.00157
		20	8.6×10^{-6}
Sistema OFDM	ITU Veh	16	0.0262
		20	0.013

Elaborado por: Autor.

3.4. Evaluación de la tasa de error de símbolos para SC-FDE y OFDM utilizando el esquema de ecualización ZF.

En esta sección se realiza los cálculos de la SER utilizando como esquema de ecualización ZF para analizar la comparativa entre los sistemas SC-FDE y OFDM utilizando los mismos canales de la sección 3.3. Los resultados de la simulación de la figura 3.3 muestran que el sistema SC-FDE

supera al sistema OFDM en el caso de los canales multitrayecto, es decir, los canales ITU Ped e ITU Veh. De la figura 3.3 se observa que en el caso del canal ITU Veh, el sistema OFDM tiene una reducción continua de la SER y minimiza significativamente la SER hasta ciertos valores de SNR en comparación con el sistema SC-FDE. Sin embargo, SC-FDE supera a OFDM para valores más altos de SNR. En las tablas 3.4 y 3.5 se muestra el resumen comparativo de los resultados obtenidos de la simulación de la figura 3.3.

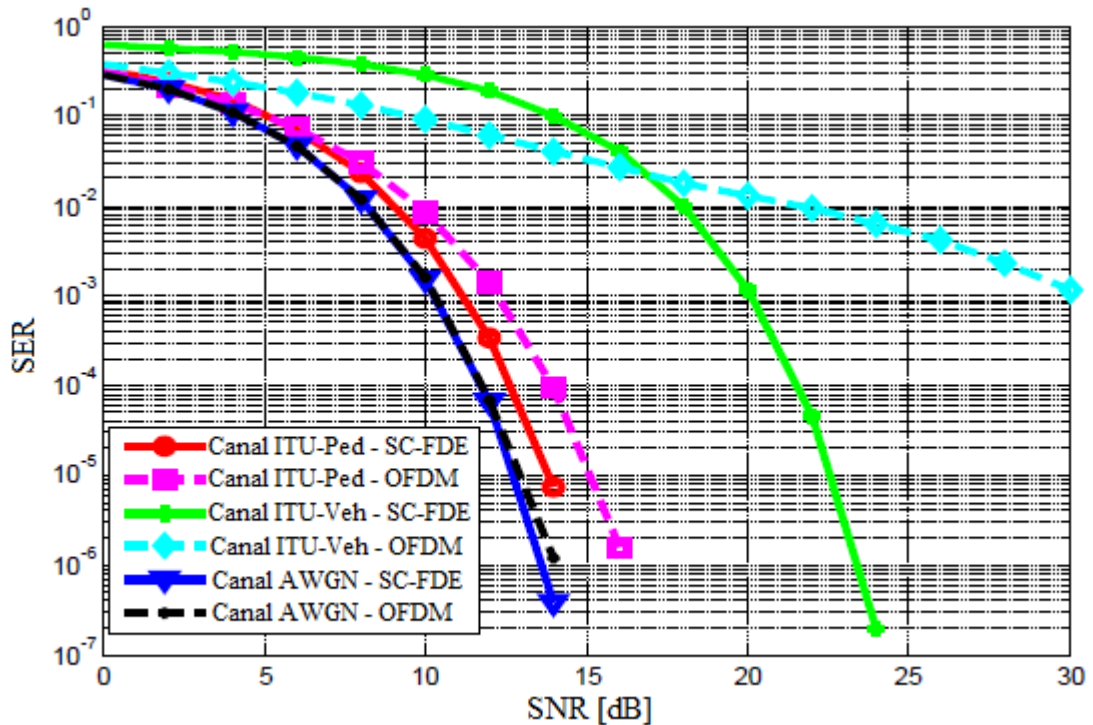


Figura 3. 4: Resultado de las métricas de la SER entre sistemas SC-FDE y OFDM usando esquemas de ecualización del estimador ZF.

Elaborado por: Autor.

En la tabla 3.4 se muestra que el sistema SC-FDE tiene un mejor rendimiento en el caso del canal AWGN y el canal ITU Ped, mientras que el sistema OFDM es mejor en el caso de un canal ITU Veh. En la tabla 3.5 muestra que el sistema OFDM ofrece un mejor rendimiento para valores más pequeños de SNR, pero para valores más altos, el sistema SC-FDE reduce significativamente la SER en comparación con el sistema OFDM, que reduce continuamente el error a medida que aumenta el valor de SNR.

Finalmente, se observa en las figuras 3.3 y 3.4 que el MMSE ofrece un mejor rendimiento en comparación con el forzamiento cero (ZF).

Tabla 3. 4: Cuadro comparativo entre los sistemas SC-FDE y OFDM usando diferentes canales con ecualización ZF.

	Canales	SNR (dB)	SER
Sistema SC-FDE	AWGN	10	0.00158
	ITU Ped	10	0.00443
	ITU Veh	10	0.2797
Sistema OFDM	AWGN	10	0.00158
	ITU Ped	10	0.00855
	ITU Veh	10	0.093

Elaborado por: Autor.

Tabla 3. 5: Cuadro comparativo entre los sistemas SC-FDE y OFDM usando el canal ITU Vehicular con ecualización ZF.

	Canales	SNR (dB)	SER
Sistema SC-FDE	ITU Veh	14	0.1004
		18	0.00974
		22	4.49×10^{-5}
Sistema OFDM	ITU Veh	14	0.0401
		18	0.018
		22	0.0092

Elaborado por: Autor.

3.5. Análisis comparativo entre los sistemas SC-FDE y OFDM con y sin prefijo cíclico.

La presente sección se realiza el análisis comparativo entre los sistemas SC-FDE y OFDM a través del canal ITU Vehicular con y sin prefijo cíclico. Para este análisis se utiliza el esquema de ecualización MMSE. En la figura 3.5 se muestra que el uso del prefijo cíclico reduce la SER en comparación con el sistema que no tiene prefijo cíclico. Además, se muestra claramente que el sistema SC-FDE proporciona una SER baja en comparación con el sistema OFDM. En la tabla 3.6 se resume la comparación obtenida de la simulación.

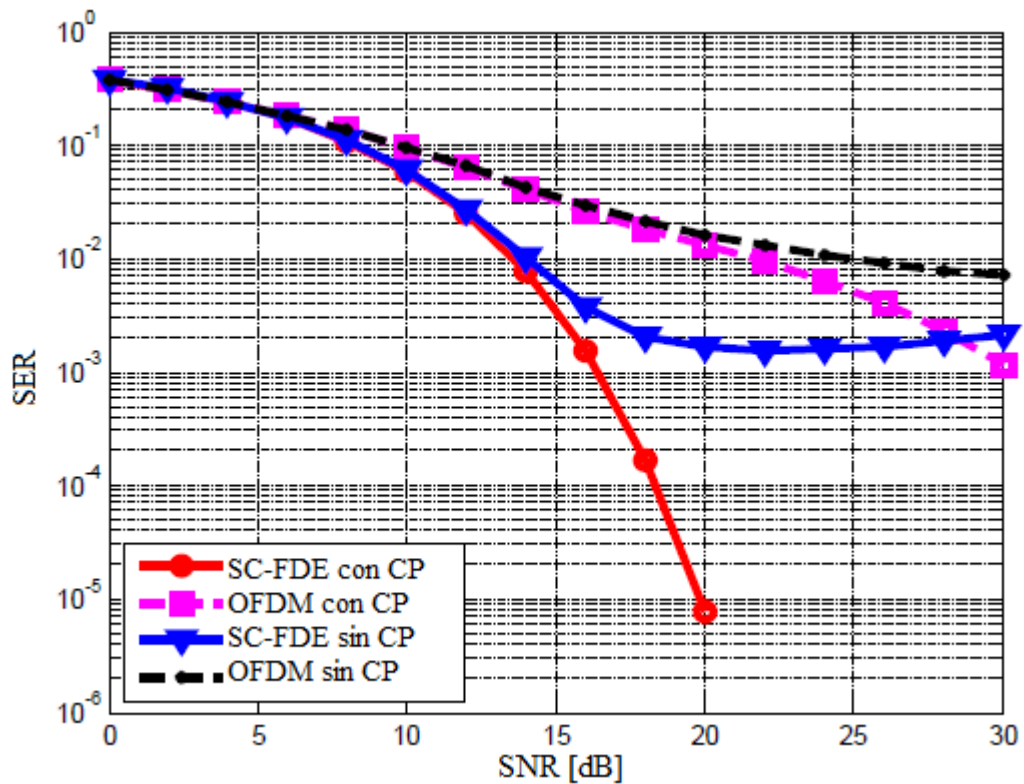


Figura 3. 5: Resultado de las métricas entre sistemas SC-FDE y OFDM con y sin prefijo cíclico usando el canal ITU Veh.

Elaborado por: Autor.

Tabla 3. 6: Cuadro comparativo entre los sistemas SC-FDE y OFDM con y sin prefijo cíclico.

	Canales	Con prefijo cíclico		Sin prefijo cíclico	
		SNR (dB)	SER	SNR (dB)	SER
Sistema SC-FDE	ITU Veh	16	0.0016	16	0.0038
		18	0.00017	18	0.00203
		22	7.81x10 ⁻⁶	22	0.00168
Sistema OFDM	ITU Veh	16	0.0263	16	0.029
		18	0.0182	18	0.021
		22	0.013	22	0.0161

Elaborado por: Autor.

3.6. Simulación para calcular la relación de potencia pico a promedio.

La relación de potencia pico a promedio se define como "la relación entre la potencia pico de la señal y la potencia media de la señal", es decir:

$$PAPR = \frac{\text{potencia pico de la señal}}{\text{potencia media de la señal}}$$

El modelo de simulación para calcular la PAPR del sistema SC-FDMA se muestra en la figura 3.9.

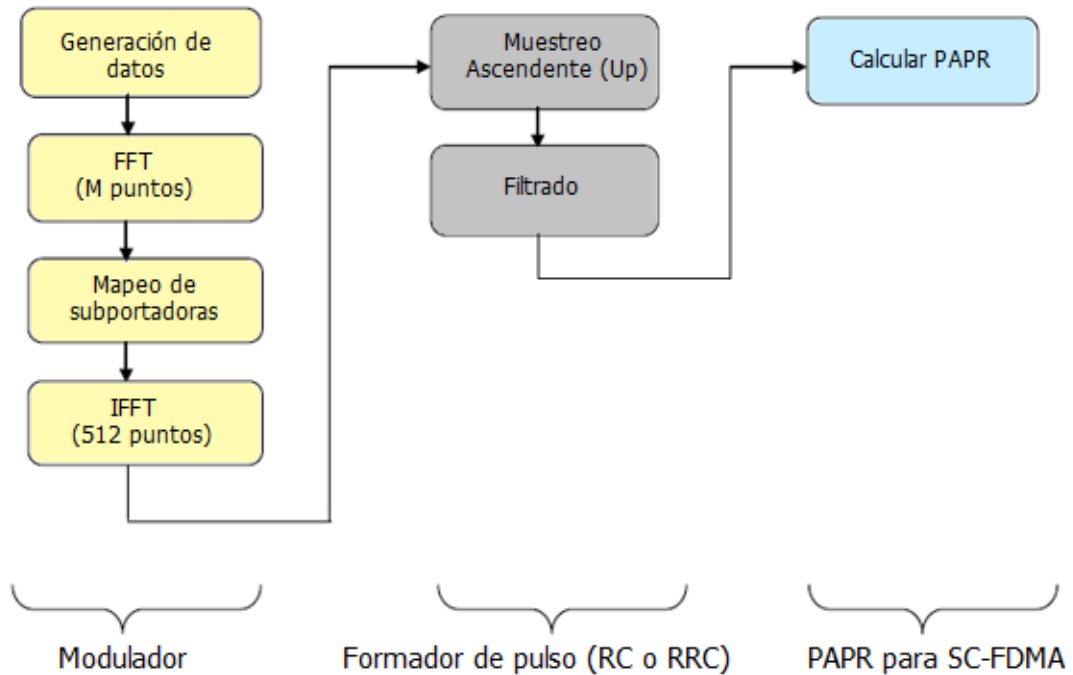


Figura 3. 6: Diagrama de bloques de la simulación para calcular la PAPR en el sistema SC-FDMA.

Elaborado por: Autor.

Para la conformación de impulsos, son utilizados los filtros de coseno aumentado (RC) y coseno de raíz cuadrada elevada (RRC), porque hacen que el receptor sea robusto frente a los errores de sincronización de temporización. Los parámetros utilizados para el cálculo del PAPR se muestran en la tabla 3.7. Para el cálculo de la PAPR se utiliza la función de distribución acumulativa complementaria (*Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF*). El CCDF se define como la probabilidad para la cual el PAPR es mayor que cualquier valor de PAPR, es decir, $PAPR_0$.

Tabla 3. 7: Parámetros usados en la simulación de calcular PAPR para el sistema SC-FDMA

Parámetros	Valores
Ancho de banda del sistema	10 MHz
Número de subportadoras (N)	512
Número de símbolos (M)	128
Factor de propagación para FDMA intercalado (IFDMA)	$Q=N/M=4$
Factor de propagación para FDMA localizado (LFDMA)	2
Factor de desplazamiento (Roll)	0.25
Factor de muestreo	4
Número de iteración	10^4
Esquemas de correlación de subportadoras	IFDMA, DFDMA, LFDMA
Intervalo de confianza	32

Elaborado por: Autor.

3.6.1. Resultado obtenido de la PAPR para sistemas SC-FDMA utilizando modulación QPSK.

El cálculo de la relación de potencia pico a promedio (PAPR) usando varios esquemas de mapeo de subportadoras para el sistema SC-FDMA se muestra en la figura 3.7, utilizando el esquema de modulación QPSK.

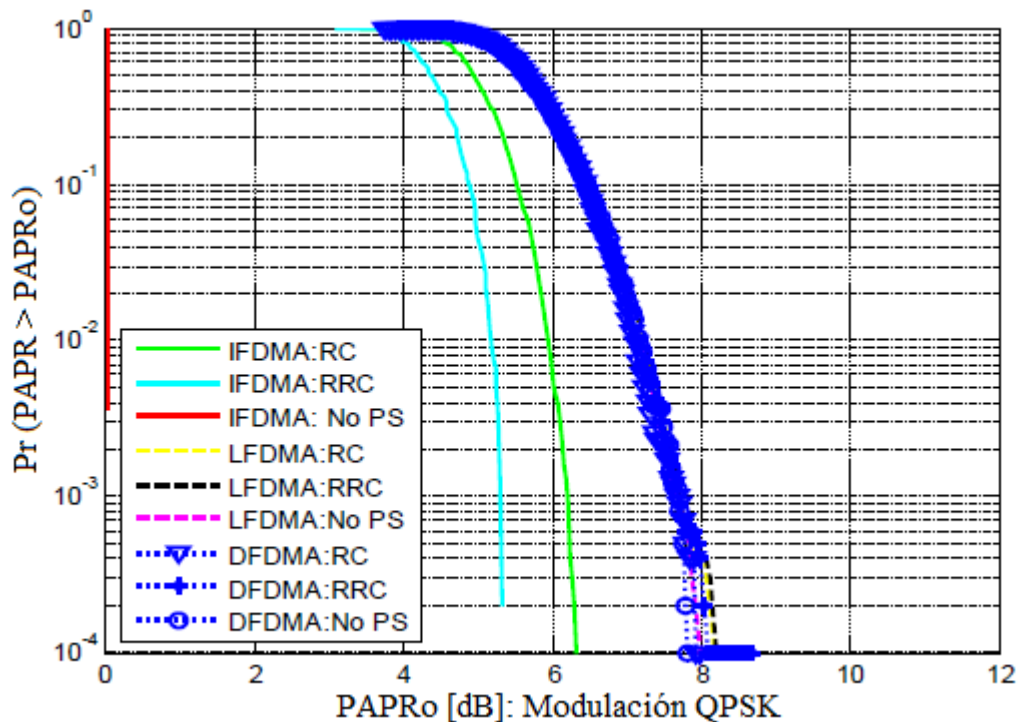


Figura 3. 7: Resultado de las métricas del sistema SC-FDMA usando QPSK.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.7 muestra que el esquema de correlación FDMA intercalado (IFDMA) proporciona los valores de PAPR más bajos en comparación con otros esquemas de mapeo de subportadoras, tales como FDMA distribuido (DFDMA) y FDMA localizado (LFDMA).

3.6.2. Resultado obtenido de la PAPR para sistemas SC-FDMA utilizando modulación 16-QAM.

El cálculo de la relación de potencia pico a promedio (PAPR) usando varios esquemas de mapeo de subportadoras para el sistema SC-FDMA se muestra en la figura 3.8. El esquema de modulación utilizado para el cálculo de PAPR es 16-QAM.

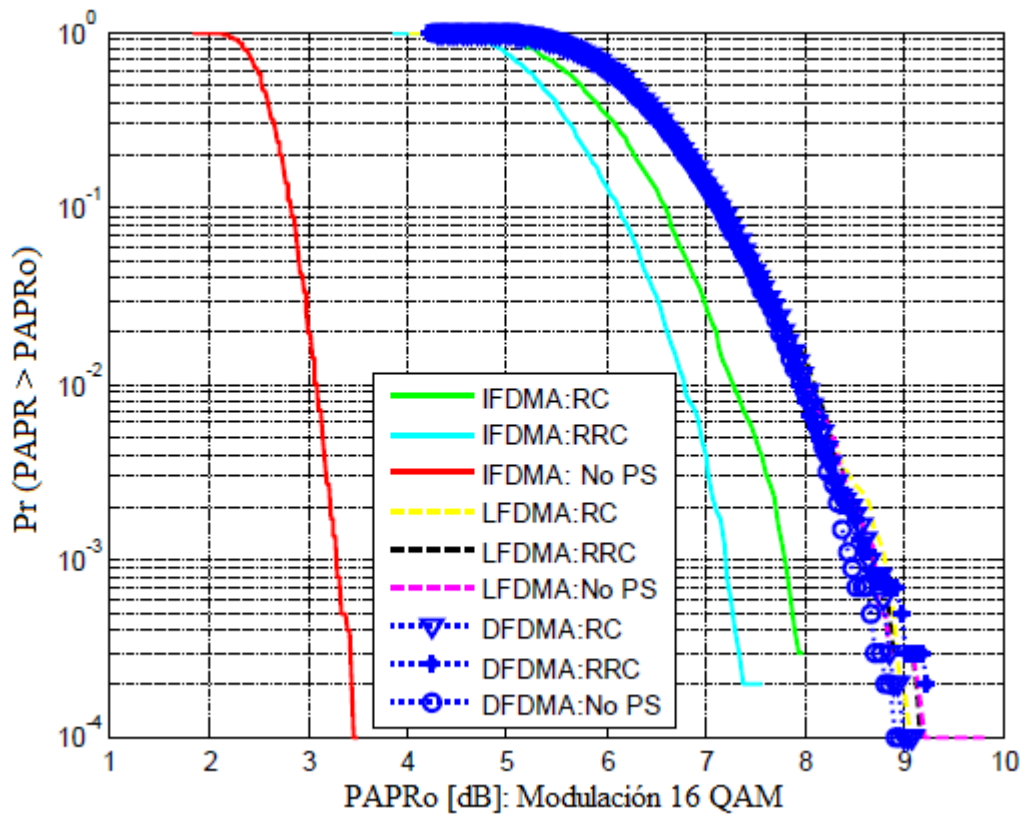


Figura 3. 8: Resultado del cálculo obtenido de PAPR para el esquema de modulación 16-QAM.

Elaborado por: El Autor

La figura 3.8 muestra que la correlación de FDMA intercalado (IFDMA) que tiene el valor más bajo de PAPR a 3.2 dB, y que para la técnica de modulación QPSK es 0 dB. También, se puede observar en la figura 3.8 que se obtuvieron valores más altos de PAPR usando la técnica de modulación

16-QAM, la cual no es deseable porque causan distorsiones no lineales en el transmisor.

3.6.3. Resultado obtenido de la PAPR para sistemas OFDMA utilizando modulaciones QPSK y 16-QAM.

Teóricamente se sabe que los sistemas OFDMA proporcionan valores de relación de potencia pico a promedio (PAPR) más altos en comparación con el sistema SC-FDMA debido a su naturaleza de multiportadora. Además, no se usa un filtro de conformación de pulsos en el sistema OFDMA. El modelo de simulación para el cálculo del PAPR para el sistema OFDMA se muestra en la figura 3.9. En la tabla 3.8 se muestra los parámetros utilizados en la simulación para calcular la relación de potencia pico a promedio en el sistema OFDMA.

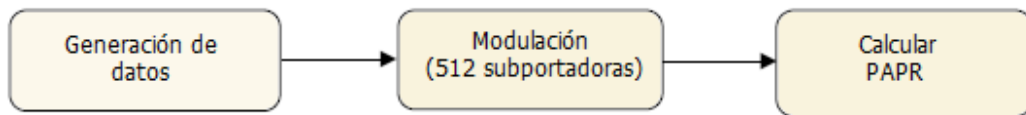


Figura 3. 9: Diagrama de bloques para calcular la PAPR del sistema OFDMA.
Elaborado por: Autor

Tabla 3. 8: Parámetros usados en la simulación de calcular PAPR para el sistema OFDMA.

Parámetros	Valores
Ancho de banda del sistema	5 MHz
Número de subportadoras (N)	512
Número de símbolos (M)	128
Frecuencia de muestreo	4
Número de iteraciones	10^4
Intervalo de confianza	32

Elaborado por: Autor.

En la figura 3.10 se muestra el cálculo de la relación de potencia pico a promedio (PAPR) del sistema OFDMA utilizando dos técnicas de modulación, que son QPSK y 16-QAM. La gráfica muestra que el valor de la relación de potencia pico a promedio del sistema OFDMA es mucho más alto que en el

sistema SC-FDMA. También, se puede observar que el comportamiento de la función de distribución acumulativa complementaria (CCDF) es bastante similar en el caso de QPSK y 16-QAM.

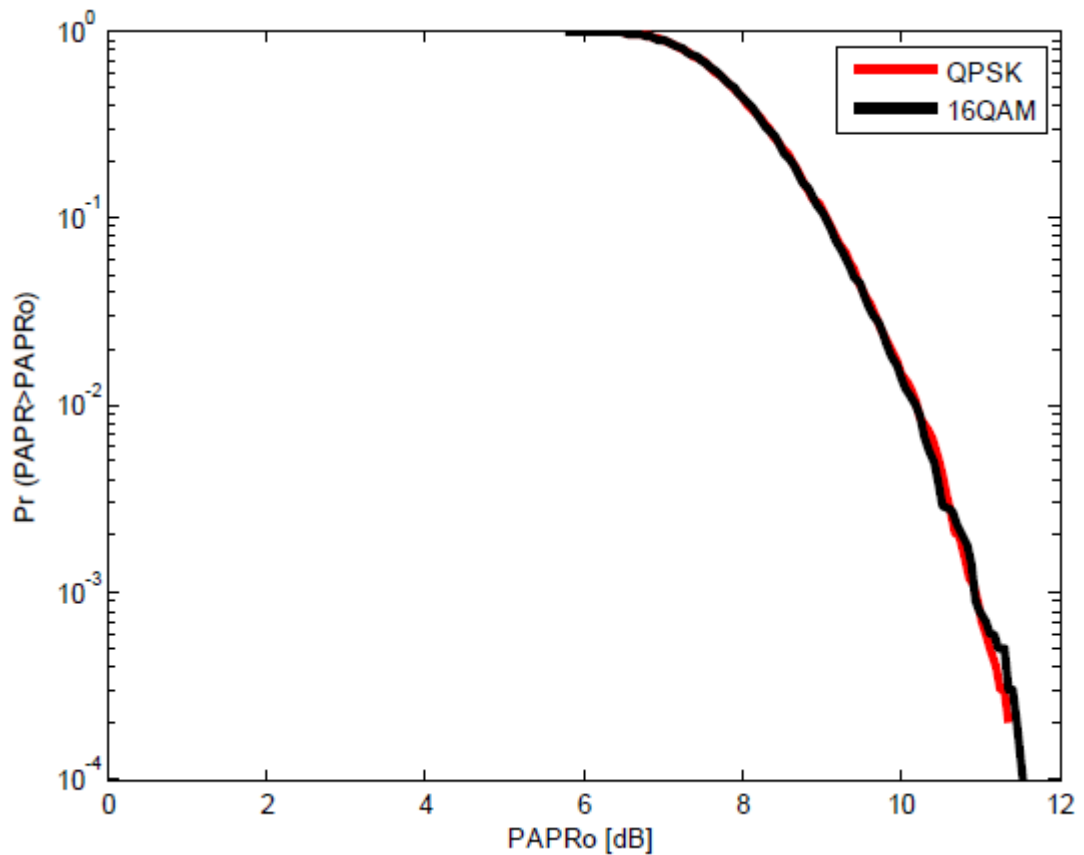


Figura 3. 10: Gráfica comparativa de PAPR entre modulaciones QPSK y 16-QAM para el sistema OFDMA.
Elaborado por: El Autor

3.7. Simulación para calcular la capacidad del sistema MIMO.

El sistema MIMO consiste en múltiples antenas de transmisión y recepción interconectadas con múltiples rutas de transmisión. MIMO aumenta la capacidad del sistema al utilizar múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor sin aumentar el ancho de banda. (Nigam & Kumar, 2014)

$$C_{MIMO} = \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{SNR}{M} \lambda \right)$$

Donde,

r es el rango de la matriz

λ , valores propios positivos de HH^H (como H^H es la conjugada de H)

SNR , es la relación señal-ruido

Mientras que para sistemas SISO, de acuerdo con la capacidad de Shannon de los canales inalámbricos, dado un canal único corrompido por un ruido Gaussiano blanco aditivo a un nivel de SNR, la capacidad se da como velocidad de datos por uso de canal como: (Nigam & Kumar, 2014)

$$C_{SISO} = \log_2(1 + SNR)$$

En casos prácticos la capacidad de SISO está dado como:

$$C_{SISO} = \log_2(1 + SNR|H|^2)$$

En la figura 3.11 se muestra la comparativa entre los sistemas MIMO y SISO en términos de capacidad. El gráfico muestra que la capacidad del sistema se puede aumentar, incrementando el número de antenas en el transmisor y el receptor. El gráfico también muestra que el sistema MIMO 8x8 tiene mayor capacidad, mientras que el sistema SISO (para el caso 1x1) tiene la capacidad más baja.

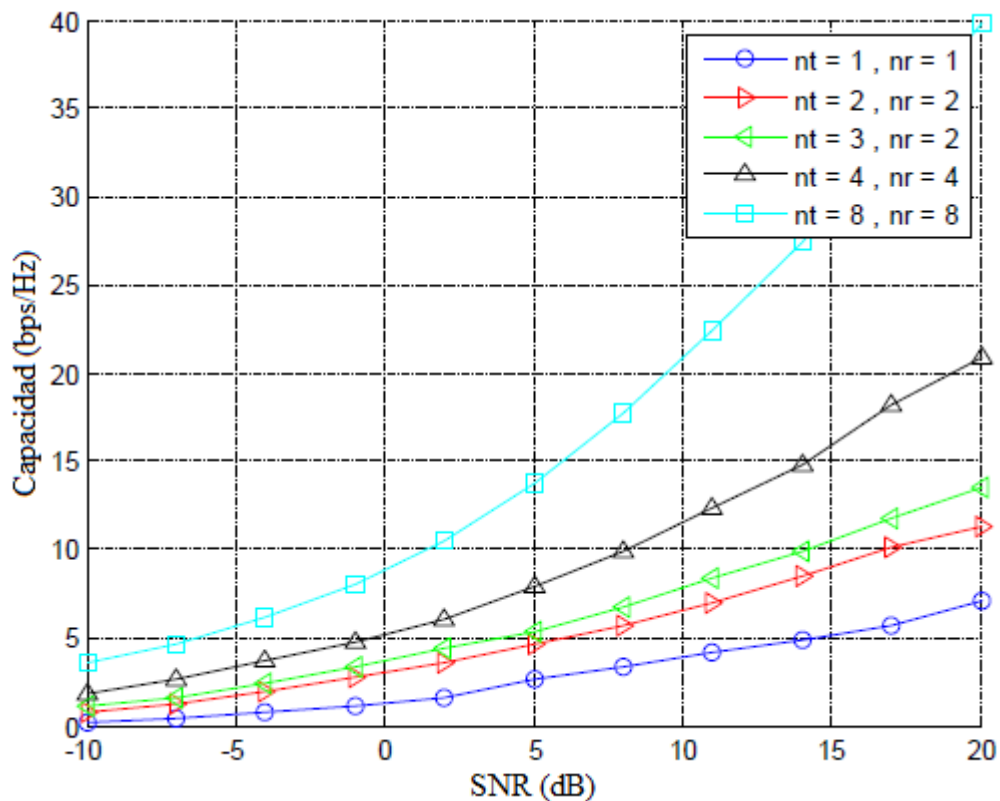


Figura 3. 11: Gráfica comparativa en términos de capacidad para sistemas SISO y MIMO.

Elaborado por: El Autor

Finalmente, en las tablas 3.9 y 3.10 se presentan los resúmenes de los resultados obtenidos durante la ejecución de la simulación comparativa entre los sistemas SISO y MIMO a nivel de capacidad (véase la figura 3.11) utilizando diferentes valores de relación señal-ruido.

Tabla 3. 9: Resumen de datos comparativos entre SISO y MIMO con una relación señal-ruido de 5 dB.

Antenas	Capacidad (bps/Hz)
SISO (1X1)	2.6
MIMO (2X2)	4.6
MIMO (3X3)	5.3
MIMO (4X4)	7.9
MIMO (8X8)	13.7

Elaborado por: Autor.

Tabla 3. 10: Resumen de datos comparativos entre SISO y MIMO con una relación señal-ruido de 14 dB.

Antenas	Capacidad (bps/Hz)
SISO (1X1)	4.9
MIMO (2X2)	8.5
MIMO (3X3)	9.9
MIMO (4X4)	14.8
MIMO (8X8)	27.5

Elaborado por: Autor.

Conclusiones

1. El objetivo principal de esta tesis fue analizar las tecnologías WiMAX y 4G-LTE en términos de capacidad y cobertura. Para lograr este objetivo, se recopiló una gran cantidad de información descrito en la fundamentación teórica, con la finalidad de desarrollar e implementar los escenarios de simulación mediante la plataforma Matlab/Simulink.
2. Dado que las redes LTE están desarrolladas para ser independientes, las versiones más bajas de UMTS no fueron considerados en el presente trabajo. WiMAX y LTE tanto en DL como UL fueron modelados en diferentes escenarios, de acuerdo con el rendimiento requerido del usuario, dicho modelo se desarrolló e implementó Matlab/Simulink.
3. Tanto WiMAX como LTE son estándares técnicamente similares. Sin embargo, existen algunas diferencias presentes en el método de acceso de enlace ascendente utilizado por ambas tecnologías. LTE usa SC-FDMA mientras que WiMAX usa OFDMA como método de acceso. La adaptación de SC-FDMA en el enlace ascendente da ventaja a LTE sobre WiMAX porque resuelve el problema de PAPR de OFDMA debido a su naturaleza de portadora única.
4. LTE ofrece mejores tasas de datos en el enlace ascendente y el enlace descendente debido al soporte del sistema MIMO en comparación con WiMAX, que solo admite MIMO en la dirección del enlace descendente. Desde una perspectiva de mercado, WiMAX tiene ventaja en LTE debido a sus primeras implementaciones.
5. Finalmente, OFDMA proporciona valores elevados de PAPR en comparación con SC-FDMA debido al uso de múltiples subportadoras.

Recomendaciones

El presente trabajo de titulación permitirá que se puedan desarrollar nuevas propuestas de investigación de la maestría en telecomunicaciones. A continuación, se realizan unas propuestas para su posterior desarrollo:

1. Verificación formal de los procedimientos de Handover (traspaso) LTE-UMTS y LTE-LTE
2. Análisis y evaluación del rendimiento de la red móvil LTE a nivel de la capa física.
3. Agregación LTE-WiFi eficiente asistida por SDN en redes de IoT de próxima generación

Bibliografía

- Ahmadi, S. (2011). *Mobile WiMAX: a systems approach to understanding the IEEE 802.16m radio access network*. Amsterdam: Elsevier/Academic Press.
- Andrews, J. G., Ghosh, A., & Muhamed, R. (2007). *Fundamentals of WiMAX: understanding broadband wireless networking*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Bagubali, A., Prithviraj, V., & Mallick, P. S. (2016). Performance analysis of IMS based LTE and WIMAX integration architectures. *Alexandria Engineering Journal*, 55(4), 3229–3238. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.08.016>
- Bao, T. (2015). The architectural differences between LTE and WiMAX. Recuperado el 3 de noviembre de 2017, a partir de <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:752548/FULLTEXT01.pdf>
- Castillo C., D. O. (2017). *Estudio comparativo entre redes LTE Advanced y LTE a nivel de CORE*. (Trabajo de Titulación). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil. Recuperado a partir de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/8609>
- Coello B., A. M. (2015, junio). *Simulación de una red WiMAX mediante Matlab/Simulink*. (Trabajo de Titulación). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil. Recuperado a partir de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/3730>
- Eklund, C. (Ed.). (2006). *WirelessMAN: inside the IEEE 802.16 standard for wireless metropolitan area networks*. New York: IEEE Press.
- ETSI. (2009). LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (3GPP TS 36.211 version 8.8.0

Release 8). Recuperado el 10 de noviembre de 2017, a partir de http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136211/08.08.00_60/ts_136211v080800p.pdf

Gupta, N. (2009). *Fixed and Mobile WiMAX*. Punjab Technical University, India.

Holma, H., & Toskala, A. (Eds.). (2009). *LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA based radio access*. Chichester, U.K: Wiley.

Hosseini, E., & Shayan, F. (2010). WiMAX. Recuperado el 4 de noviembre de 2018, a partir de <http://www.geoinfocom.ca/articles/GICWimax.html>

Hsieh, H.-H., Lee, B.-H., Wu, H.-K., Hsu, W.-P., & Chien, H.-C. (2017). A wireless network simulator based on design patterns for WiMAX and LTE (pp. 1669–1672). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICASI.2017.7988256>

Kumar, S. (2015). *Wireless communication: the fundamental and advanced concepts*. Aalborg: River Publishers.

Monserate C., R. J. (2017). *Rendimiento de la capa física del estándar IEEE 802.16 usando diferentes esquemas de modulación*. (Trabajo de Titulación). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil. Recuperado a partir de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/8450>

More, S., & Mishra, D. K. (2012). 4G Revolution: WiMAX technology (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AHICI.2012.6408433>

Mori, U. R., Chandarana, P. M., Gajjar, G. V., & Dasi, S. (2015). Performance comparison of different modulation schemes in advanced technologies WiMAX and LTE (pp. 286–289). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IADCC.2015.7154715>

- Muñoz M., L. D. (2014). *Modelado y evaluación de una red de voz sobre LTE*. (Tesis de Maestría). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil. Recuperado a partir de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/3057>
- Navarro V., J. C. (2015). *Simulación de señales distribuidas en RoF para redes WiMAX a través de la modulación OFDM y 64-QAM*. (Trabajo de Titulación). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil. Recuperado a partir de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/4329>
- Nigam, H., & Kumar, M. (2014). Capacity enhancement and design analysis of UWB MIMO OFDM over SISO system using microstrip antennas (pp. 1–8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRAIE.2014.6909159>
- OBSAI. (2006). BTS System Reference Document. Recuperado el 3 de noviembre de 2017, a partir de http://www.obsai.com/specs/OBSAI_System_Spec_V2.0.pdf
- Prasetyo, B. (2015). LTE Architecture. Recuperado el 9 de noviembre de 2017, a partir de <http://www.ltehandbooks.com/2015/10/lte-architecture.html>
- Rezaei, F., Hempel, M., & Sharif, H. (2012). A comprehensive performance analysis of LTE and Mobile WiMAX (pp. 939–944). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IWCMC.2012.6314331>
- Rodriguez, J. V. P., & Esmailpour, A. (2016). Integrated QoS provisioning for unified LTE-WiMAX networks (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCNC.2016.7440597>
- Roodaki, M., Raahemifar, K., & Raahemi, B. (2014). Analysis of Quality of Services in LTE and Mobile WiMAX. *Computers & Electrical*

Engineering, 40(5), 1508–1523.
<https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2014.04.002>

Seyedzadegan, M., & Othman, M. (2013). IEEE 802.16: WiMAX Overview, WiMAX Architecture. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 784–787. <https://doi.org/10.7763/IJCTE.2013.V5.796>

Srikanth, S., Murugesu Pandian, P., & Fernando, X. (2012). Orthogonal frequency division multiple access in WiMAX and LTE: a comparison. *IEEE Communications Magazine*, 50(9), 153–161. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2012.6295726>

Williams, D. (2004). I'll Take All 4 Gs. Recuperado el 3 de noviembre de 2017, a partir de <https://blogs.gnome.org/dcbw/2011/01/20/ill-take-all-4-gs/>

Yang, T.-H., Jan, R.-H., Chen, C., & Lin, Y.-H. (2010). An ART-based ASN-GW relocation algorithm for WiMAX networks (pp. 889–894). IEEE. <https://doi.org/10.1109/COMPSYM.2010.5685387>

Zubairi, J. A., Erdogan, E., & Reich, S. (2015). Experiments in fair scheduling in 4G WiMAX and LTE (pp. 277–282). IEEE. <https://doi.org/10.1109/HPCSim.2015.7237050>



**Presidencia
de la República
del Ecuador**



**Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes**



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Mora Pallo, Fredy Antonio** con C.C: # 200005738-6 autor del trabajo de titulación: Análisis comparativo de la capacidad y cobertura en redes WiMAX y 4G utilizando esquemas de modulación y codificación, 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, 1 de junio del 2018

f. _____

Nombre: **Mora Pallo, Fredy Antonio**

C.C: 200005738-6

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA			
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN			
TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Análisis comparativo de la capacidad y cobertura en redes WiMAX y 4G utilizando esquemas de modulación y codificación		
AUTOR(ES)	Mora Pallo, Fredy Antonio		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	MSc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio; MSc. Zamora Cedeño, Néstor / MSc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Sistema de Posgrado		
PROGRAMA:	Maestría en Telecomunicaciones		
TÍTULO OBTENIDO:	Magister en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	1 de junio del 2018	No. DE PÁGINAS:	75
ÁREAS TEMÁTICAS:	Comunicaciones Inalámbricas		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Comunicaciones inalámbricas, WiMAX, LTE, OFDM, Modulación, Codificación.		
RESUMEN/ABSTRACT:	<p>El presente trabajo de titulación consiste en realizar un análisis comparativo entre las tecnologías WiMAX y LTE a nivel de capacidad y cobertura empleando esquemas de modulación y codificación sobre la plataforma Matlab/Simulink. Inicialmente, se realiza la búsqueda bibliográfica de trabajos de titulación e investigación publicados en repositorios y revistas científicas. Después, se realiza una descripción teórica de las comunicaciones inalámbricas, como WiMAX y LTE, lo que permitió establecer las bases teóricas para el desarrollo de los escenarios de simulación. Posteriormente, se tuvo que pensar en la plataforma de simulación idónea para modelar las redes WiMAX y LTE. Se realizó un análisis entre las plataformas: Opnet Modeler, NS-3, OMNeT y Matlab/Simulink. Este último se escogió por su robustez en el momento de realizar simulaciones utilizando diagramas de bloques de Simulink. Finalmente, se diseñaron los escenarios para WiMAX y LTE utilizando esquemas de modulación y codificación, cuyos resultados fueron muy óptimos y que encajan a los parámetros definidos en los estándares que operan estas dos tecnologías.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: 0999861105	E-mail: fredymorap@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Manuel Romero Paz		
	Teléfono: 0994606932		
	E-mail: mromeropaz@yahoo.com		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			