



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Implementación del esquema de modulación/codificación y capacidad
en sistemas LTE utilizando herramienta de simulación Opnet**

AUTOR:

Ing. Erazo Pineda, Eddie Wider

Examen complejo previo a la obtención del Grado Académico de

MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, 3 de diciembre del 2021



**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 **Erazo Pineda, Eddie Wider** 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, 3 de diciembre del 2021



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Erazo Pineda, Eddie Wider**

DECLARÓ QUE:

El examen complejo **“Implementación del esquema de modulación/codificación y capacidad en sistemas LTE utilizando herramienta de simulación Opnet”**, previa a la obtención del grado Académico de **Magíster en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

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

Guayaquil, 3 de diciembre del 2021

EL AUTOR

Erazo Pineda, Eddie Wider



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, **Erazo Pineda, Eddie Wider**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del examen complejo titulado: **“Implementación del esquema de modulación/codificación y capacidad en sistemas LTE utilizando herramienta de simulación Opnet”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 3 de diciembre del 2021

EL AUTOR

Erazo Pineda, Eddie Wider

REPORTE DE URKUND

URKUND Abrir sesión

Documento	Eddie_Erazo.docx (D120411874)
Presentado	2021-11-29 17:41 (-05:00)
Presentado por	fernandopm23@hotmail.com
Recibido	edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com
Mensaje	Revisión Examen Complexivo EDDIE ERAZO Mostrar el mensaje completo 1% de estas 19 páginas, se componen de texto presente en 1 fuentes.

Lista de fuentes Bloques

+	Categoría	Enlace/nombre de archivo	-
+	>	https://docplayer.es/88856951-Universidad-cat...	<input type="checkbox"/>
+		https://docplayer.es/77509260-Universidad-cat...	<input type="checkbox"/>
+		https://bibliotecaunapec.blob.core.windows.ne...	<input type="checkbox"/>
+		https://1library.co/article/estructura-del-slot-y...	<input checked="" type="checkbox"/>
-	Fuentes alternativas		
+	Fuentes no usadas		

0 Advertencias. Reiniciar Compartir

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

TEMA: Implementación del esquema de
modulación/codificación y capacidad en sistemas LTE
utilizando herramienta de simulación Opnet

AUTOR: Ing. Erazo Pineda, Eddie Wider

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

TUTOR: M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

4 de noviembre del 2021

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

Dedicatoria

A Dios por permitirme un día más de vida, a pesar por las circunstancias que estamos pasando debido a la pandemia.

A mis padres Edison Erazo Cuero y Miriam Pineda Alfonso por todo el apoyo que me han dado en las decisiones que he tomado. Al enseñarme a no rendirme nunca y seguir adelante en mis metas y objetivos.

A mi hermano Kevin Erazo Pineda por todos los momentos que hemos compartido. Por su apoyo, por su compañía y su paciencia.

A mi mejor amiga Jenny Hidalgo, por contar con su apoyo. Por escucharme y aconsejarme. Por estar siempre conmigo, en los buenos y malos momentos.

Erazo Pineda, Eddie Wider

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Católica Santiago de Guayaquil, por brindar siempre lo mejor en educación y a la Facultad Técnica.

Gracias a los catedráticos, que, durante el transcurso de la maestría, compartieron sus conocimientos, dándonos sus consejos y experiencias en el campo.

Al Ing. Fernando Palacios, que me brindó su apoyo como tutor en el transcurso de este trabajo de titulación.

Y sobre todo agradezco a mis compañeros de la Maestría en Telecomunicaciones, especialmente a los ingenieros Carlos Chicaiza, Wilson Nuñez y Michael Rochina, que me brindaron su amistad y apoyo en el transcurso de la maestría. Gracias.

Erazo Pineda, Eddie Wider



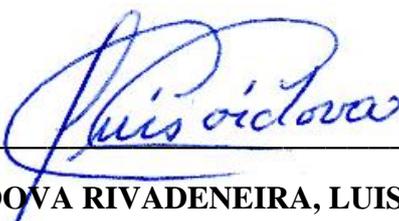
**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 

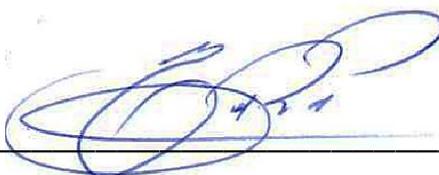
M. Sc. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO
TUTOR

f. 

M. Sc. CÓRDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO
REVISOR

f. 

M. Sc. QUEZADA CALLE, EDGAR RAUL
REVISOR

f. 

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

ÍNDICE GENERAL

Índice de Figuras	XI
Índice de Tablas.....	XIII
Resumen	XIV
Abstract.....	XV
Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.....	16
1.1. Introducción.....	16
1.2. Antecedentes.....	16
1.3. Definición del problema	17
1.4. Justificación del problema a investigar.	17
1.5. Objetivos.....	17
1.6. Hipótesis.....	18
1.7. Metodología de investigación.	18
Capítulo 2: Fundamentos Teóricos.....	19
2.1. Introducción de las redes de acceso inalámbrico móvil.....	19
2.2. Definición de red móvil.	19
2.3. Evolución de las redes de comunicaciones móviles.....	19
2.4. Sistemas de comunicaciones móviles de 1G.	20
2.4.1. Características técnicas de la comunicación móvil 1G.....	21
2.4.2. Ventajas y desventajas de la comunicación móvil 1G.....	22
2.5. Sistemas de comunicaciones móviles de 2G.	22
2.5.1. Características técnicas de la comunicación móvil 2G.....	22
2.5.2. Sistema GSM.	22
2.5.3. Sistema GPRS de la comunicación móvil 2.5 G.....	25
2.5.4. Sistema EDGE de la comunicación móvil 2.75 G.....	26
2.6. Sistemas de comunicaciones móviles de 3G.	27
2.6.1. Red UMTS.....	28
2.6.2. Características técnicas de la red UMTS:	28
2.6.3. Ventajas y desventajas de la red UMTS.....	29
2.6.4. Técnica de multiplexación CDMA.....	29

2.7.	Sistemas de comunicaciones móviles de 4G.	30
2.7.1.	Arquitectura de red 4G/LTE.....	31
2.7.2.	Características técnicas del LTE:	32
2.7.3.	Técnica de multiplexación OFDMA.	33
Capítulo 3: Diseño y análisis de resultados.		34
3.1.	Diseño del modelo de red de comunicación móvil 4G.	34
3.2.	Descripción del escenario de simulación 1: capacidad del canal. ..	34
3.2.1.	Tasa máxima de bits de datos para el canal.	35
3.2.2.	Capacidad del enlace descendente.....	35
3.2.3.	Capacidad del enlace ascendente.....	38
3.2.4.	Generación de tráfico para aplicaciones bajo demanda del cliente. 39	
3.2.5.	Análisis de resultados de la capacidad de canal de red LTE. .	42
3.3.	Descripción del escenario de simulación 2: esquema de modulación y codificación.....	47
Conclusiones		51
Recomendaciones		52
Bibliografía		53

Índice de Figuras

Capítulo 2:

Figura 2. 1: Evolución histórica de los sistemas de comunicaciones móviles.	20
Figura 2. 2: Representación esquemática de un sistema de sensores inalámbricos.....	23
Figura 2. 3: Ejemplo ilustrativo de la técnica de acceso múltiple FDMA.	24
Figura 2. 4: Ejemplo ilustrativo de la técnica de acceso múltiple TDMA.	25
Figura 2. 5: Representación de los principales componentes de una red GPRS estándar.....	26
Figura 2. 6: Representación de los principales componentes de una red UMTS.....	28
Figura 2. 7: Ejemplo ilustrativo de la técnica de acceso múltiple CDMA.....	30
Figura 2. 8: Arquitectura general de la red 4G/LTE.	32
Figura 2. 9: Ejemplo de la técnica de acceso múltiple OFDMA.	33

Capítulo 3:

Figura 3. 1: Estructura jerárquica de agrupación de nodos en una WSN. ...	34
Figura 3. 2: Configuración de parámetros para la definición de la aplicación de voz.	40
Figura 3. 3: Configuración de parámetros para la definición del perfil de voz.	41
Figura 3. 4: Configuración de parámetros para la aplicación de voz en los UEs.	42
Figura 3. 5: Configuración de parámetros de la red LTE.	43
Figura 3. 6: Capacidad máxima del enlace ascendente y descendente, respectivamente, en la red MAC.....	45
Figura 3. 7: Transferencia de datos para la utilización de PDSCH y PUSCH para una capacidad máxima de 10 MHz.....	46

Figura 3. 8: Rendimiento máximo (capa de aplicación) en bytes para diferentes anchos de banda de canal para la aplicación de VoLTE.	47
Figura 3. 9: Configuración de parámetros de los esquemas MCS para un ancho de banda de 5 MHz.	49
Figura 3. 10: Capacidad máxima de enlace ascendente y descendente en la capa MAC para 5MHz en diferentes esquemas MCS.....	49
Figura 3. 11: Rendimiento máximo para la red LTE a 5 MHz en diferentes esquemas MCS.	50

Índice de Tablas

Capítulo 2:

Tabla 2. 1: Ventajas y desventajas de la comunicación móvil de primera generación.....	22
Tabla 2. 2: Ventajas y desventajas del sistema GSM.....	24
Tabla 2. 3: Ventajas y desventajas del sistema GPRS.....	26
Tabla 2. 4: Ventajas y desventajas del sistema EDGE.....	27

Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Tasa de datos máxima real del enlace descendente LTE (3-PDCCH).....	37
Tabla 3. 2: Tasa de datos máxima real del enlace descendente LTE (1-PDCCH).....	38
Tabla 3. 3: Velocidad máxima real de datos en el enlace ascendente LTE.	39
Tabla 3. 4: Resumen de los resultados obtenidos para el escenario 1.....	47
Tabla 3. 5: Resumen de los resultados obtenidos para el escenario 2.....	50

Resumen

La demanda de ancho de banda (BW) en la comunicación móvil crece exponencialmente día a día ya que el número de usuarios ha aumentado drásticamente en los últimos años. La tecnología LTE se ha consolidado en las redes celulares de banda ancha celular debido al continuo aumento de la demanda de datos de alta velocidad. El presente documento presenta el estudio de la implementación del esquema de modulación/codificación y capacidad de canales en sistemas LTE utilizando la herramienta de simulación Opnet. En el capítulo 1, se presenta las generalidades del proyecto de examen complejo y en donde se exponen el objetivo general y los objetivos específicos de la investigación. En el capítulo 2, representa la descripción teórica de los sistemas de comunicaciones móviles desde la primera hasta la cuarta generación de telefonía móvil. En el capítulo 3, se presenta los escenarios de simulación del modelo de la red LTE propuesto en el software de simulación Opnet, utilizando esquemas de modulación y codificación.

Palabras claves: Comunicaciones, Modulación, Codificación, Capacidad, Canales, Ancho de banda

Abstract

The demand for bandwidth (BW) in mobile communication is growing exponentially day by day as the number of users has increased dramatically in recent years. LTE technology has been consolidated in cellular broadband cellular networks due to the continuous increase in the demand for high-speed data. This paper presents the study of the implementation of modulation/coding scheme and channel capacity in LTE systems using the Opnet simulation tool. In chapter 1, the generalities of the complex review project are presented and where the general objective and specific objectives of the research are exposed. Chapter 2 presents the theoretical description of mobile communications systems from the first to the fourth generation of mobile telephony. Chapter 3 presents the simulation scenarios of the LTE network model proposed in the Opnet simulation software, using modulation and coding schemes.

Keywords: Communications, Modulation, Coding, Capacity, Channels, Bandwidth, Bandwidth

Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.

1.1. Introducción.

En los últimos años, las autoridades de telecomunicaciones se afanan en decidir cómo emerger al entorno 4G motivadas por el aumento exponencial de la demanda de servicios avanzados de telecomunicaciones que requieren un espectro más amplio y una mayor calidad de servicio. Por otro lado, los expertos de la industria de las telecomunicaciones se esfuerzan por estandarizar nuevos sistemas inalámbricos móviles que puedan hacer frente a los deseos y ambiciones de los usuarios de las telecomunicaciones y allanar el camino para la evolución de las nuevas tecnologías.

En la evolución a largo plazo (LTE), los algoritmos de asignación de recursos (RAA) son un área de trabajo en la que los investigadores buscan optimizar el uso eficiente de los escasos recursos de radio. La selección de un esquema de modulación y codificación (Modulation and Coding Scheme, MCS) óptimo que permita a la red LTE adaptarse a las condiciones del canal es un segundo ámbito de trabajo en curso. En la parte inalámbrica de LTE, estos dos factores, la selección de RAA y MCS, son los más críticos en la optimización. (Gutierrez et al., 2020)

El área de investigación de la optimización de la asignación de recursos en las redes celulares ha recibido una gran atención. Debido a una creciente necesidad de aplicaciones inalámbricas adaptativas en tiempo real, los estándares actuales y los que se están fusionando admiten varios esquemas de modulación superiores. Por ejemplo, la evolución a largo plazo (LTE), el estándar inalámbrico de cuarta generación (4G) especificado por el Proyecto de Asociación de Tercera Generación (3GPP), y que admite esquemas de modulación como QPSK, 16-QAM y 64-QAM según LTE-Advanced (LTE-A). (Wang & Abdelhadi, 2015)

1.2. Antecedentes.

El esquema de modulación y codificación (MCS) define cuántos bits útiles pueden transmitirse por elemento de recurso (RE). El MCS depende de

la calidad del radioenlace. Cuanto mejor sea la calidad, mayor será el MCS y más datos útiles podrán transmitirse. Y viceversa, cuanto peores sean las condiciones de radio, menor será el MCS y menos datos útiles se podrán transmitir. En otras palabras, la MCS depende de la probabilidad de error. Normalmente hay un umbral de probabilidad de error definido que es igual al 10%. Para mantener la probabilidad de error no más que este valor en condiciones de radio variables, el MCS se ajusta en consecuencia. En LTE se hace una vez por TTI (1 ms) individualmente para cada usuario activo.

1.3. Definición del problema

Necesidad de realizar la implementación del esquema de modulación/codificación y capacidad en sistemas LTE utilizando herramienta de simulación Opnet para comprobar el comportamiento de los MCS.

1.4. Justificación del problema a investigar.

Las condiciones de radio influyen en las tasas de bits de los usuarios. Cuanto mejores sean las condiciones de radio, mayor será el rendimiento disponible y viceversa. El eNB (eNodeB, estación base) selecciona el esquema de modulación y codificación (MCS) en función de las condiciones de radio actuales. Cuanto más alto sea el MCS, más bits se pueden transmitir por unidad de tiempo. El equipo de usuario (UE) o dispositivo móvil mide la calidad del canal de radio y envía el indicador de calidad del canal (CQI) al eNB.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General:

Implementar el esquema de modulación/codificación y capacidad en sistemas LTE utilizando herramienta de simulación Opnet.

1.5.2. Objetivos específicos:

- Describir los fundamentos teóricos de los sistemas de comunicaciones móviles y sus arquitecturas.

- Diseñar el modelo de red LTE con voz utilizando esquemas de modulación/codificación y de capacidad de los canales ascendente y descendente.
- Evaluar las métricas de rendimiento de la red LTE usando el esquema MCS y capacidad de canales.

1.6. Hipótesis

Con la implementación de esquemas de modulación/codificación y capacidad de canales ascendente y descendentes se comprobará el rendimiento de la red LTE modificando los parámetros de los siete esquemas propuestos.

1.7. Metodología de investigación.

El presente trabajo de examen complejo utiliza un enfoque cuantitativo, ya que maneja datos que se obtienen a partir de escenarios de simulación. El tipo de investigación es empírico-analítico y el diseño de investigación que se utiliza es el descriptivo, explicativo, exploratorio y de modelos de simulación. En todo el documento se puede verificar que se realiza una descripción de los fundamentos teóricos, después se explica el uso del modelo de red y finalmente se exploran los escenarios de simulación.

Capítulo 2: Fundamentos Teóricos.

2.1. Introducción de las redes de acceso inalámbrico móvil.

La evolución de Internet en las redes de acceso inalámbrico tiene un gran impacto en el estilo de vida de las personas en todo el mundo. Los servicios móviles no han dejado de evolucionar desde la introducción de la comunicación celular a principios de la década de 1980. Esta evolución de las tecnologías inalámbricas ha creado gradualmente varias redes que conducen a un entorno heterogéneo cada vez más complejo. En este contexto, los usuarios móviles, con diferentes perfiles y preferencias, quisieran estar siempre conectado a la mejor red en todo momento, sin tener que preocuparse por las diferentes transiciones entre redes heterogéneas.

El objetivo de este capítulo es presentar primero la evolución de las redes móviles en general para familiarizarse con los términos y tecnologías utilizados. Se describen las diferentes generaciones de telefonía móvil de 1G, 2G, 3G y 4G, y finalmente con una comparativa entre ellas.

2.2. Definición de red móvil.

La red móvil es una red de comunicación inalámbrica, que se distribuye en áreas llamadas celdas, cada una de ellas servida por al menos un transceptor de ubicación fija conocido por la estación base. Esta estación base proporciona a la celda cobertura de red que se puede utilizar para la transmisión de voz y datos. Una celda puede utilizar un conjunto de frecuencias diferente al de las celdas vecinas, para evitar interferencias y proporcionar una calidad de servicio garantizada en cada celda.

2.3. Evolución de las redes de comunicaciones móviles.

Las redes de 1ª generación (también denominadas 1G) se integraron a la red de telecomunicaciones en la década de 1980 (véase figura 2.1). Sin embargo, estos sistemas fueron abandonados hace unos años para dar paso a la segunda generación, denominada 2G lanzada en 1991. Sigue ahí, activa en la actualidad. Se pueden distinguir otros dos tipos de generaciones dentro

de la segunda generación, que son: 2.5 G y 2.75 G. El principal estándar que utiliza 2G es el sistema global para comunicaciones móviles (GSM).

La generación de estándares permite el acceso a diversos servicios, como el uso de WAP para acceder a Internet, ambos llevaron a la 3ª generación conocida como 3G permite alta velocidad para el acceso a Internet y la transferencia de datos. En lo que se refiere a la nueva generación 4G o LTE (Long Term Evolution), desplegada hasta entonces solo por algún país, permite altísima velocidad, luego llegan las tecnologías IMT-2020 (International Mobile Telecommunications- 2020) de quinta generación (5G) grandes pasos, y tienen un inmenso potencial transformador para mejorar nuestras vidas.

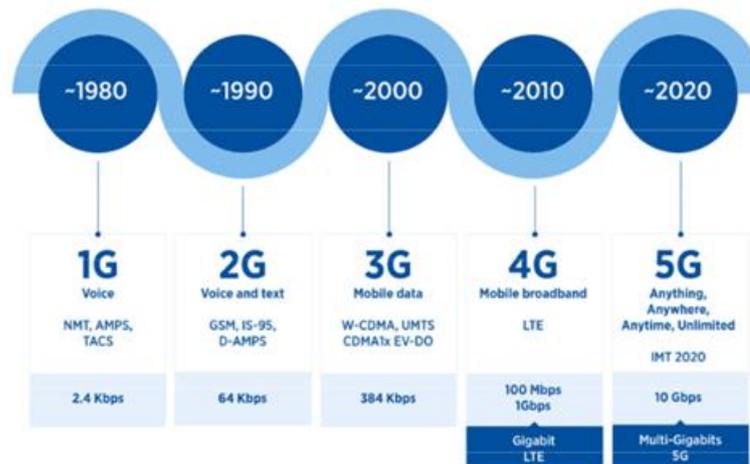


Figura 2. 1: Evolución histórica de los sistemas de comunicaciones móviles.
Fuente: (Unitec, 2020).

2.4. Sistemas de comunicaciones móviles de 1G.

La primera generación de sistemas celulares (1G) se basó en un sistema de comunicaciones móviles analógicas y solo pudo manejar el tráfico de voz. Su tecnología de modulación de radio es similar a la utilizada por las estaciones de radio FM. La calidad de comunicación ofrecida por la primera generación de teléfonos móviles, equipo muy voluminoso, tenía limitaciones obvias relacionadas con el tipo de señal, como mala calidad de sonido y no garantiza la confidencialidad durante la comunicación (un receptor desconocido equipado con una radio de todas las bandas puede escuchar la conversación) y la red se satura rápidamente.

La primera generación de sistemas celulares (1G) utilizó principalmente los siguientes estándares:

- Sistema avanzado de telefonía móvil (Advanced Mobile Phone System, AMPS), lanzado en los Estados Unidos, es una red analógica basada en la tecnología de acceso múltiple por división de frecuencia (Frequency Division Multiple Access, FDMA).
- Telefonía móvil nórdica (Nordic Mobile Telephone, NMT) se diseñó principalmente en los países nórdicos y se utilizó en otras partes del mundo.
- Sistema de comunicaciones de acceso total (Total Access Communications System, TACS), que se basa en la tecnología AMPS, se ha utilizado ampliamente en Gran Bretaña [2].

Técnicamente, estos sistemas se basaban en codificación y modulación analógicas. Utilizaron una técnica de acceso múltiple llamada FDMA (asociando una frecuencia con un usuario).

2.4.1. Características técnicas de la comunicación móvil 1G.

A continuación, se presentan las características principales de la tecnología móvil de 1G.

- Los canales de control son canales de datos que funcionan a 10 kbps.
- Los canales de voz transportan comunicaciones mediante señales analógicas
- Módulos de frecuencia.
- Banda de transmisión de la estación base: 869 a 894 MHz.
- Banda de transmisión móvil: 824 a 849 MHz.
- Espaciado de canales de enlace ascendente y descendente: 45 MHz.
- Ancho de banda del canal: 30 KHz.
- Potencia máxima del móvil: 3W.
- Tamaño de celda: 2 a 20 km.
- Velocidad de transmisión: 10 kbps.

2.4.2. Ventajas y desventajas de la comunicación móvil 1G.

En la tabla 2.1 se muestra un cuadro comparativo de las ventajas y desventajas de la comunicación móvil 1G.

Tabla 2. 1: Ventajas y desventajas de la comunicación móvil de primera generación.

Ventajas	Desventajas
1. Primer radioteléfono inalámbrico analógico	1. Gran tamaño de los equipos
	2. No hay confidencialidad en las comunicaciones
	3. Redes saturadas

Fuente: (Gobbo et al., 2013)

2.5. Sistemas de comunicaciones móviles de 2G.

La segunda generación (2G) de sistemas celulares basados en tecnología digital se desarrolló a fines de la década de 1980. Este sistema proporciona mejor calidad y mayor capacidad a un menor costo para el usuario. También permitió al usuario con un dispositivo móvil transferir datos digitales de bajo volumen (principalmente texto, con SMS o fotos, con MMS).

2.5.1. Características técnicas de la comunicación móvil 2G.

La segunda generación (2G) marcó una ruptura con la primera generación de teléfonos móviles gracias al cambio de analógico (1G) a digital.

- Caudal máximo de 9.600 kbps.
- Modo de conmutación de circuitos
- Basado en tecnología digital
- Un teléfono = un terminal + una tarjeta inteligente
- Éxito internacional: presencia en muchos países

La segunda generación de sistemas celulares (2G) utiliza esencialmente los siguientes estándares:

2.5.2. Sistema GSM.

Estándar digital de segunda generación (2G) desarrollado por el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI) y comercializado a

principios de la década de 1990. GSM opera en las bandas de 850 MHz y 1900 MHz en los Estados Unidos, 900 MHz y 1800 MHz en el resto del mundo. La figura 2.2 muestra el sistema GSM y que comprende en:

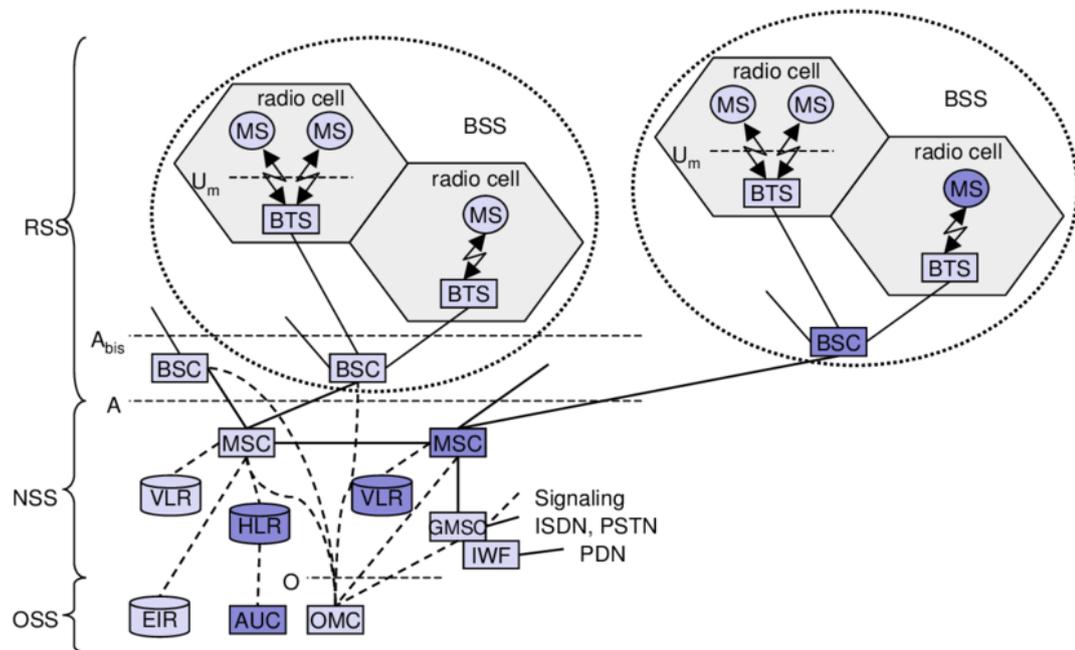


Figura 2. 2: Representación esquemática de un sistema de sensores inalámbricos.
Fuente: (Schäfer et al., 2001; Siba, 2012).

- Subsistema de radio (Radio Sub-System, RSS): cubre todos los aspectos de radio.
- Estación móvil (Mobile Station, MS)
- Subsistema de estación base (Base Station Subsystem, BSS) o red de acceso por radio (Radio Access Network, RAN)
- Estación base transceptora (Base Transceiver Station, BTS).
- Controlador de estación base (Base Station Controller, BSC)
- Red y subsistema de conmutación (Network and Switching Subsystem, NSS): desvío de llamadas, transferencia intercelular.
- Centro de conmutación de servicios móviles (Mobile services Switching Center, MSC)
- Registro de ubicación (Location Register, LR): HLR y VLR
- Subsistema de operaciones (Operation Sub-System, OSS): gestión de red.

- Centro de operación y mantenimiento (Operation and Maintenance Center, OMC)
- Centro de autenticación (Authentication Center, AuC)
- Registro de identidad del equipo (Equipment Identity Register, EIR)

a. Ventajas y desventajas del sistema GSM.

Tabla 2. 2: Ventajas y desventajas del sistema GSM.

Ventajas	Desventajas
1. Mejor calidad de escucha	1. Rendimiento: envío de datos lento
2. Menor tamaño	
3. Confidencialidad de las comunicaciones	

Fuente: (Gobbo et al., 2013)

b. Tipos de multiplexación en los sistemas GSM:

Para aumentar la capacidad de la red, el sistema GSM utiliza las dos técnicas de multiplexación:

❖ **Acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA)**

El acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA) es el método de acceso múltiple más utilizado. Esta técnica es la más antigua y permite diferenciar a los usuarios por simple diferenciación de frecuencias. La aplicación de esta tecnología es bastante sencilla. En efecto, para escuchar al usuario N, el receptor sólo tiene en cuenta la frecuencia F_N asociada. La figura 2.3 se muestra el ejemplo ilustrativo de la técnica FDMA.

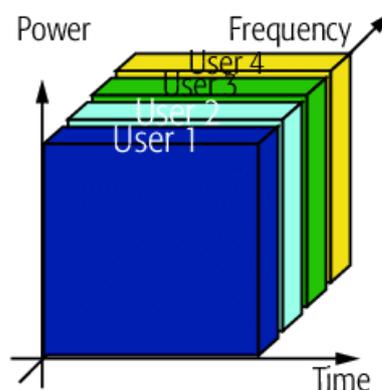


Figura 2. 3: Ejemplo ilustrativo de la técnica de acceso múltiple FDMA.

Fuente: (Chen et al., 2018)

Sin embargo, un operador no dedica una banda de frecuencias por usuario, ya que esto supondría un desperdicio de recursos radioeléctricos al transmitir un usuario de forma intermitente. Además, con este sistema, si una fuente de interferencia emite ruido a una determinada frecuencia, la señal en la banda de frecuencia que contiene la interferencia se verá perturbada. Para resolver estos problemas, la multiplexación en frecuencia se combina con el acceso múltiple por división de tiempo (TDMA).

❖ Acceso múltiple por división de tiempo (TDMA).

Un método de acceso que se basa en la distribución de los recursos en el tiempo. Cada usuario envía o transmite en una franja horaria concreta cuya periodicidad está definida por la duración de la trama. En este caso, para escuchar al usuario N, el receptor sólo tiene que considerar la franja horaria N asociada a este usuario. La figura 2.3 se muestra el ejemplo ilustrativo de la técnica TDMA.

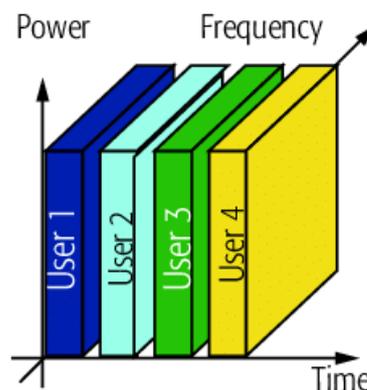


Figura 2. 4: Ejemplo ilustrativo de la técnica de acceso múltiple TDMA.

Fuente: (Chen et al., 2018)

En el caso de GSM, consiste en dividir cada canal de comunicación en tramas de 8 intervalos de tiempo. Así, con TDMA, por ejemplo, es posible hacer que ocho usuarios hablen uno tras otro en el mismo canal. Por tanto, se multiplican el número de canales disponibles por unidad de tiempo por ocho.

2.5.3. Sistema GPRS de la comunicación móvil 2.5 G.

El sistema de servicio general de radiocomunicación por paquetes (General Packet Radio Service, GPRS) es un sistema móvil intermedio entre las tecnologías 2G y 3G, que ofrece altas velocidades de datos. Además, los

servicios de Internet y los servicios de paquetes son muy adecuados. GPRS se basa en la modulación por desplazamiento gaussiano (Gaussian Modulation Shift Keying).

a. Elementos de la red GPRS (véase la figura 2.5):

- GGSN (Gateway GSN): unidad de interfuncionamiento entre GPRS y la red de paquetes de datos (Packet Data Network, PDN)
- GSN (Serving GSN): admite MS (ubicación, facturación, seguridad).
- HLR (Registro GPRS - GR): conserva la información sobre la ubicación y la seguridad

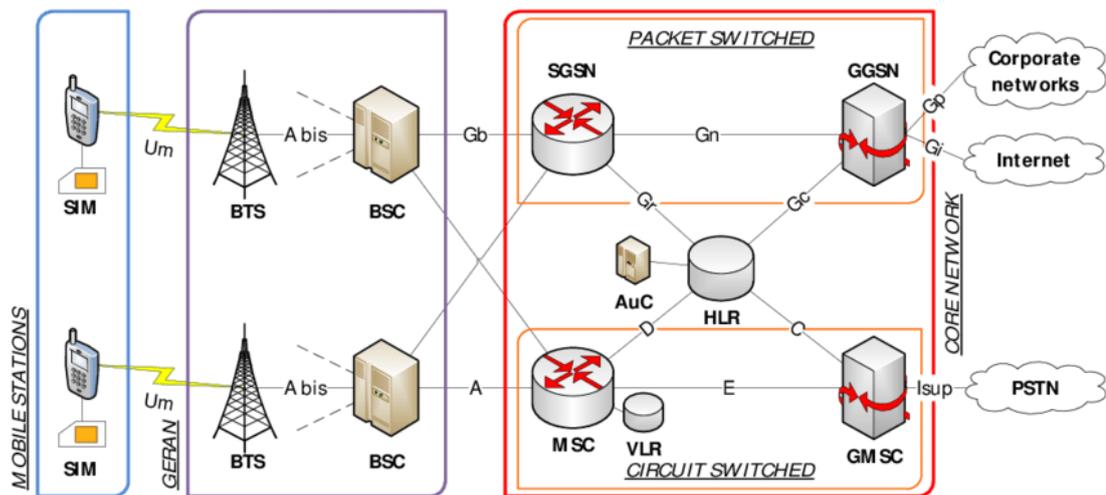


Figura 2. 5: Representación de los principales componentes de una red GPRS estándar.

Fuente: (Gobbo et al., 2013)

b. Ventajas y desventajas del sistema GPRS.

Tabla 2. 3: Ventajas y desventajas del sistema GPRS.

Ventajas	Desventajas
Velocidad de flujo	No hay acceso satisfactorio a Internet
Facturación por datos	Red GSM ya saturada
Acceso WAP	No hay aplicación decisiva para el público en general
Posibilidad de conexión permanente	
Soporte para múltiples niveles de calidad de servicio	

3. Fuente: (Gobbo et al., 2013)

3.1.1. Sistema EDGE de la comunicación móvil 2.75 G.

Estándar derivado de GSM que permite mayor velocidad de datos para usuarios estacionarios. A menudo se lo conoce como 2.75 G porque es la evolución de GPRS desarrollado en 2005, que introduce la modulación por desplazamiento de 8 fases (8-Phase Shift Keying, 8-PSK). Los dispositivos se convirtieron tanto en un televisor como en un reproductor de música, la gente necesitaba poder ver videos en tiempo real y descargar archivos mp3 más rápido; esto es precisamente lo que permite EDGE. En la tabla 2.4 se muestran las ventajas y desventajas del sistema EDGE.

Tabla 2. 4: Ventajas y desventajas del sistema EDGE.

Ventajas	Desventajas
1. Alternativa más barata a la 3G	1. Obligación de cambiar de terminal
2. Velocidad de datos superior a GPRS	

Fuente: (Gobbo et al., 2013)

3.2. Sistemas de comunicaciones móviles de 3G.

Es una generación de sistemas móviles etiquetados como IMT-2000 por la UIT. Este sistema permite servicios de comunicaciones más rápidos, incluidos voz, fax, Internet desde cualquier lugar y en cualquier momento. Las frecuencias utilizadas para 3G están en las bandas de 900 MHz y 2100 MHz. La tercera generación de sistemas celulares (3G) utiliza en particular las siguientes normas:

- Sistema universal de telecomunicaciones móviles (Universal Mobile Telecommunications System; UMTS): solución europeo-japonesa para sistemas 3G.
- Una interfaz de radio basada en WCDMA con FDD: UTRA-FDD
- Una interfaz de radio basada en TDMA-CDMA con TDD: UTRA-TDD
- UMTS se caracteriza por velocidades teóricas del orden de 2 Mbps y prácticas del orden de unos pocos cientos de kbps.
- CDMA 2000, que existe notablemente en los Estados Unidos derivado de IS-95.

Estas tecnologías permiten velocidades mucho más rápidas que las de la generación anterior y permiten usos multimedia como transmisión de video, TV móvil, telefonía de video o acceso a Internet de alta velocidad.

3.2.1. Red UMTS.

La arquitectura de la red UMTS es similar a la de la red GSM, tal como se observa en la figura 2.6. Todos los componentes e interfaces de la red GSM son incorporados a la arquitectura de UMTS. La red tiene dos áreas principales:

- dominio de los equipos de los usuarios.
- dominio de las infraestructuras:
 - ✓ red de acceso universal UTRAN o RAN
 - ✓ red central (CN)

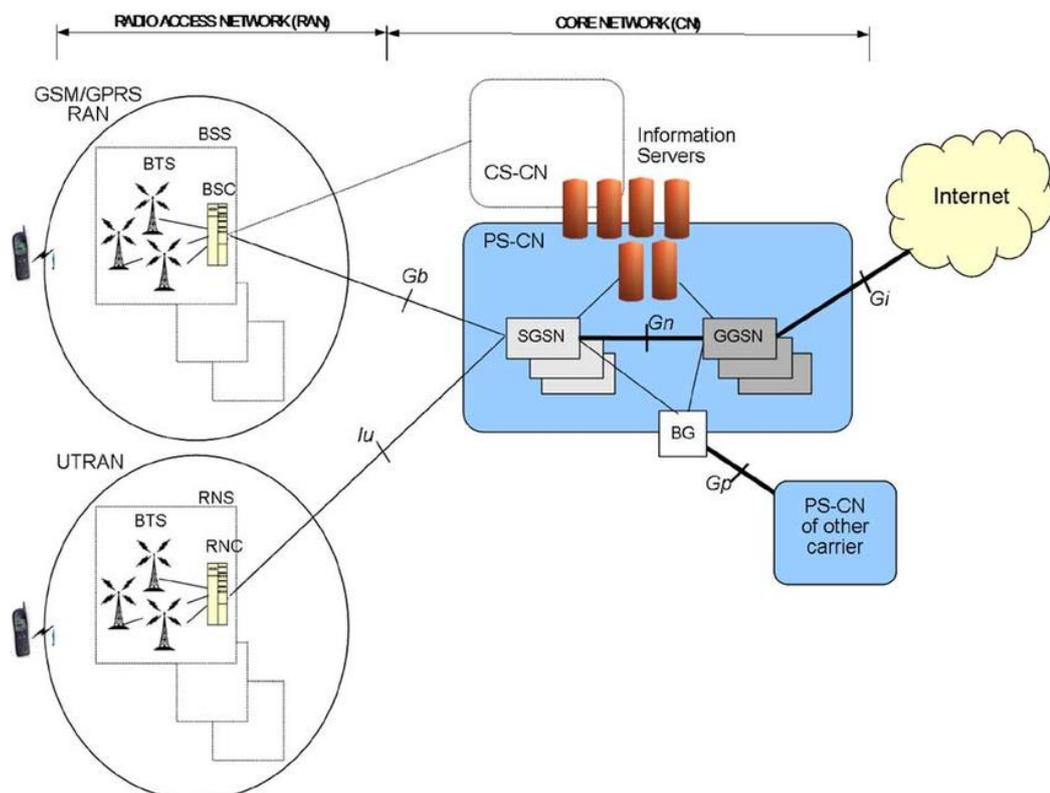


Figura 2. 6: Representación de los principales componentes de una red UMTS.

Fuente: (Hao Yang et al., 2006)

3.2.2. Características técnicas de la red UMTS:

- Garantizar servicios de alta velocidad con un máximo de 144 Kbps en cualquier tipo de entorno y hasta 2 Mbps en ambientes interiores y con movilidad reducida.

- Transmitir datos simétricos (con la misma velocidad de enlace ascendente y descendente) y asimétricos.
- Proporcionar servicios de conmutación de circuitos (ideal para voz) y de conmutación de paquetes (ideal para transmisión de datos).
- Calidad de voz comparable a la de las redes de cable.
- La capacidad espectral y la eficiencia deben ser superiores a las de los sistemas celulares de segunda generación.
- Posibilidad de ofrecer servicios multimedia durante una misma conexión con diferentes calidades de servicio (velocidad, tasa de error, ...) para diferentes tipos de medios (voz, audio, datos)
- Compatibilidad con redes de acceso radioeléctrico de segunda generación. Roaming entre los diferentes sistemas de tercera generación, es decir la compatibilidad entre ellos.
- Cobertura universal mediante la vinculación de satélites a redes terrestres.

3.2.3. Ventajas y desventajas de la red UMTS.

En unos años se han desarrollado extensiones para mejorar las velocidades ofrecidas. En particular, se pueden observar tres subtecnologías de 3G:

- HSPA (High Speed Packet Access), a veces llamado generación 3.5G, que se caracteriza por una evolución de UMTS para una velocidad máxima teórica de 14.4 Mbps y práctica de aproximadamente 3.6 Mbps).
- HSPA + (High Speed Packet Access +), a veces denominado generación 3.75G, que se caracteriza por una velocidad máxima teórica de 21 Mbps y práctica de alrededor de 5 Mbps).
- DC-HSPA + (Dual-Cell High Speed Packet Access +), también llamada generación 3.75 G, que se caracteriza por una velocidad máxima teórica de 42 Mbps y práctica de más de 10 Mbps.

3.2.4. Técnica de multiplexación CDMA.

Varias estaciones usan la misma banda de frecuencia y pueden transmitir al mismo tiempo. La figura 2.7 muestra la técnica de acceso múltiple

por división de código (CDMA). Cada estación utiliza su propio código para transmitir (Código = una secuencia de n bits conocida por el transmisor y el receptor). Cada bit (1 o 0) a transmitir se multiplica por el código y se transmiten n bits. Es decir, que se adopta el ensanchamiento de espectro en la que "casi todas" las redes 3G han adoptado CDMA.

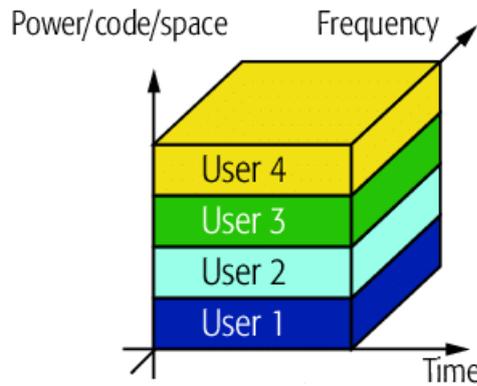


Figura 2. 7: Ejemplo ilustrativo de la técnica de acceso múltiple CDMA.
Fuente: (Chen et al., 2018)

3.3. Sistemas de comunicaciones móviles de 4G.

Las redes LTE (Long Term Evolution), comercialmente llamadas 4G, representan una evolución importante en comparación con las redes GSM y UMTS. Los estándares que especifican las redes LTE provienen de 3GPP como los estándares UMTS, pero introducen muchas modificaciones y mejoras.

Los principales desarrollos en 4G radican en el aumento de las velocidades máximas teóricas (mejor velocidad real y mejor capacidad de las redes para transportar tráfico) y tiempos de latencia más cortos (tiempo de reacción reducido que permite una mejor interactividad). Esto le da al usuario una conexión aproximadamente 3 veces más rápida que 3G.

Las frecuencias utilizadas para 4G están en las bandas de 800 MHz, 1800 MHz y 2600 MHz como UMTS. LTE es una tecnología celular que ofrece la posibilidad de reutilizar las mismas radiofrecuencias en celdas de radio contiguas, gracias a la OFDMA y SC-Codificaciones de radio FDMA y una codificación para identificar células. Esto permite asignar a cada celda un

ancho espectral que varía de 5 a 20 MHz y, por lo tanto, tener un mayor ancho de banda y un mayor rendimiento en cada celda.

3.3.1. Arquitectura de red 4G/LTE

Como todas las redes inalámbricas móviles, la red 4G LTE consta de tres partes como se muestra en la figura 2.8:

- UE: el equipo móvil (teléfono inteligente, tableta, computadora portátil) debe ser compatible con la red 4G que permite una velocidad teórica de 100 Mbps.
- Red universal de acceso por radio evolucionado (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network, E-UTRAN): solo contiene eNodeBs que garantizan el intercambio de radio con E-UTRAN
- La red central de núcleo de paquetes evolucionado (Evolved Packet Core, EPC) totalmente IP: utiliza tecnologías de "IP completa"

Es una red "sin obstáculos", en la que todos los dispositivos IP se comunican directamente entre sí sin necesidad de ir de un lado a otro con los dispositivos de nivel superior. El EPC tiene cuatro bloques funcionales:

- Entidad de gestión de movilidad (Mobility Management Entity, MME): entre estas funcionalidades se tiene la señalización, autenticación y gestión de la lista del área de seguimiento.
- Entidad receptora de servicio (Serving GateWay, S-GW): entre estas características se tiene el punto de anclaje para el traspaso entre eNodeB, punto de anclaje para el traspaso de LTE y redes 2G/3G, y enrutamiento y retransmisión de paquetes.
- Entidad de la puerta de enlace de la red de paquetes de datos (Packet Data Network GateWay, P-GW): entre estas características se tiene la interfaz a redes externas (Internet e intranet), asignación de direcciones IP de la UE, y etiquetado de paquetes en las direcciones ascendente y descendente.
- Entidad del servidor de abonados (Home Subscriber Server, HSS): HSS es un HLR avanzado y contiene información de suscripción para redes GSM, GPRS, 3G, LTE e IMS.

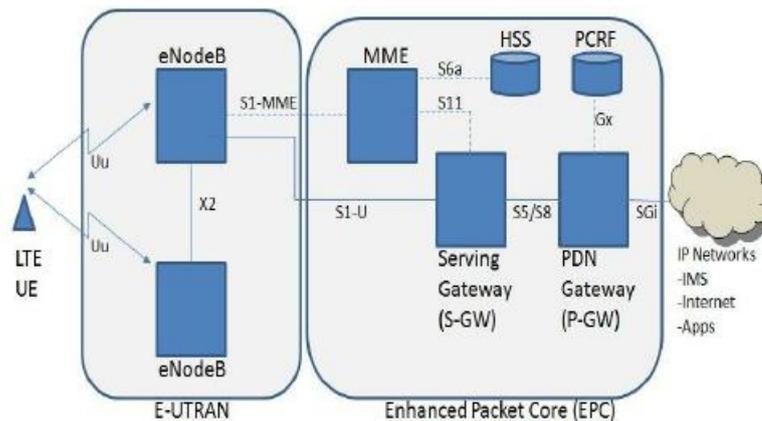


Figura 2. 8: Arquitectura general de la red 4G/LTE.

Fuente: (Ghassan, 2014)

3.3.2. Características técnicas del LTE:

- Interfaz de radio mejorada para aumentar la velocidad y la capacidad de carga / descarga.
- Retardo de acceso reducido: el retardo de ida y vuelta es inferior a 10 ms y la inicialización es inferior a 100 ms para admitir servicios interactivos y en tiempo real.
- Movilidad: el rendimiento de LTE se optimiza en caso de que la velocidad sea inferior a 15 km/h. LTE admite velocidades de 120 a 350 km/h (o incluso 500 km/h, según la banda utilizada)
- Flexibilidad del espectro de radio: LTE se puede implementar en bandas que van desde 1.25 MHz a 20 MHz, y la banda emparejada y no emparejada de 3G. Esto permite al operador implementar LTE en la banda existente, no solicitar la nueva licencia de banda. LTE admite FDD y TDD.
- Arquitectura “Todo IP”, hay una parte importante del trabajo de 3GPP para convertir la arquitectura de la red central en una arquitectura totalmente IP que está prevista para simplificar el Inter funcionamiento con redes cableadas y redes inalámbricas que no son 3GPP.
- La arquitectura simplificada mejora la escalabilidad de la red.
- Compatibilidad con redes 3G existentes. LTE debe admitir el traspaso con redes existentes como UMTS / HSPA y GSM / GPRS /

EDGE. Además, debe admitirse el traspaso entre dominios entre sesiones de conmutación de paquetes y de circuitos.

3.3.3. Técnica de multiplexación OFDMA.

La tecnología LTE se basa en una combinación de tecnologías sofisticadas que incluso elevan significativamente el nivel de rendimiento (muy alta velocidad y latencia) en comparación con las redes 3G existentes. La multiplexación OFDMA (acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal) optimiza el uso de frecuencias minimizando la interferencia. El uso de múltiples técnicas de antenas (ya utilizadas para Wi-Fi o WiMax) permite multiplicar los canales de comunicación en paralelo, lo que aumenta la velocidad total y el alcance. La figura 2.9 muestra un ejemplo de la técnica de acceso múltiple OFDMA.

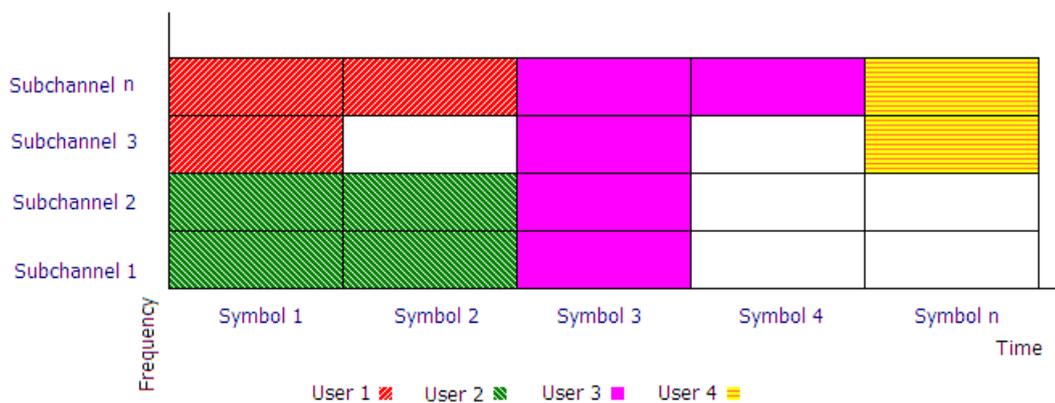


Figura 2. 9: Ejemplo de la técnica de acceso múltiple OFDMA.

Fuente: (Castellanos, 2012)

Capítulo 3: Diseño y análisis de resultados.

3.1. Diseño del modelo de red de comunicación móvil 4G.

En esta sección se presenta el diseño del modelo de red de la comunicación móvil 4G o LTE sobre la plataforma de simulación Opnet Modeler. El simulador Opnet Modeler versión 17.5 es un simulador de nivel de sistema dinámico impulsado por eventos basado en paquetes que simula de manera precisa y eficiente el comportamiento de varios tipos de redes del mundo real. OPNET Modeler tiene una interfaz gráfica de usuario (GUI) con un sentido "fácil de usar". Tiene una enorme biblioteca al servicio del usuario.

Para la investigación a realizar en este documento, se utilizará el simulador Opnet Modeler para simular dos escenarios de la red LTE con el propósito de comparar su rendimiento y capacidad de canal que incluye el número de usuarios activos que puede soportar el sistema al mismo tiempo, en diferentes situaciones.

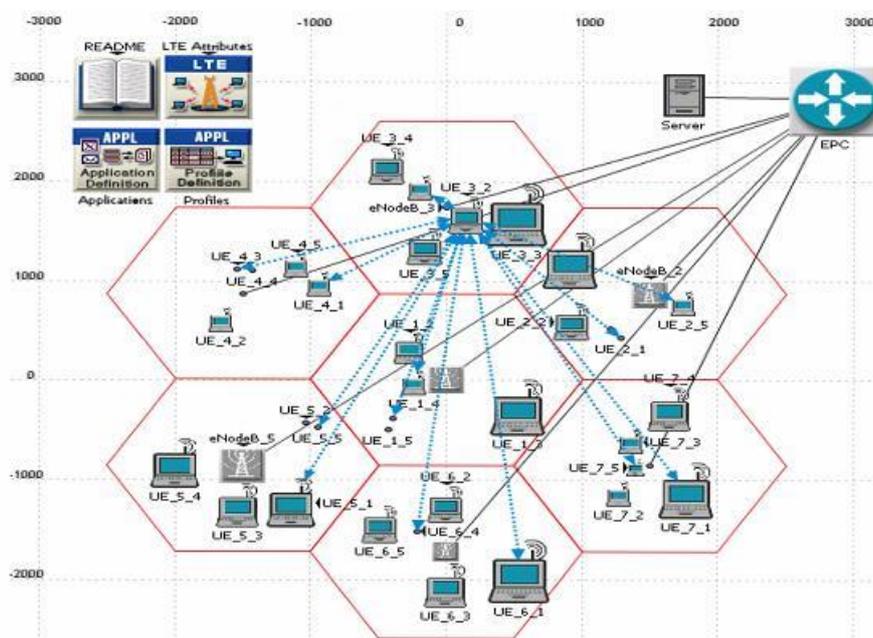


Figura 3. 1: Estructura jerárquica de agrupación de nodos en una WSN.

Elaborado por: Autor.

3.2. Descripción del escenario de simulación 1: capacidad del canal.

La capacidad del canal depende del ancho de banda del canal, del índice de modulación y codificación (MCS) y de la multiplexación espacial MIMO. Al

principio, la capacidad y el tamaño de los paquetes de tráfico se calculan matemáticamente como sigue en las siguientes subsecciones.

3.2.1. Tasa máxima de bits de datos para el canal.

En LTE, el espectro se separa en fragmento o bloques de tamaño fijo denominados bloques de recursos (Resource Blocks, RB). El bloque de recursos es el elemento básico para la asignación de recursos radioeléctricos y puede darse para un solo dispositivo móvil de usuario (User Equipment, UE). El tamaño de cada bloque de recursos es de 0.5 ms en el dominio del tiempo y de 180 kHz en el dominio de la frecuencia. La asignación de recursos en las direcciones de enlace ascendente y descendente se realiza en el eNodeB. Los últimos cálculos para la tasa de bits de datos máximos se pueden resumir en la siguiente ecuación:

$$R [\text{bits/second}] = N_{streams} Q_m N_{RB} N_{SC}^{RB} \frac{N_{symb}^{sf}}{TTI[\text{ms}] \times 10^{-3}}$$

Donde Q_m es el orden de modulación, N_{RB} es el número de bloques de recursos para el ancho de banda, N_{SC}^{RB} es el número de subportadoras por bloque de recursos, N_{symb}^{sf} el número de símbolos por subtrama y TTI es el intervalo de la subtrama (1ms).

3.2.2. Capacidad del enlace descendente.

De acuerdo con la versión 8 del estándar 3GPP y restringido a escenarios limitados, se utilizan opcionalmente de 1 a 3 símbolos por subtrama para el canal de control del enlace descendente físico (PDCCH). Debido a que el tamaño de los paquetes para VoLTE es pequeño, se utilizan 3 símbolos para PDCCH por subtrama para aumentar el número de usuarios activos. Se utilizan 8 elementos de recursos (REs) por subtrama como señales de referencia en el caso de un puerto de antena, mientras que 16 REs en el caso de dos puertos de antena y 24 REs en el caso de cuatro puertos de antena. En consecuencia, el porcentaje de sobrecarga de control se incrementa.

El canal indicador del formato de control físico (PCFICH) y canal indicador de solicitud de repetición automática híbrido físico (PHICH) se distribuyen en parte del primer símbolo en PDCCH para todo el ancho de banda del canal. En el caso de un puerto de antena, el PBCH ocupa 46 REs para cada uno de los 6 bloques de recursos físicos (PRBs) situados en el centro del canal, mientras que 44 REs en el caso de dos puertos de antena y 40 REs en el caso de cuatro puertos de antena. El PSS utiliza 62 REs para los seis PRBs situados en el centro del canal, en la primera y quinta subtramas, y 10 REs reservados, pero no utilizados para los 2 PRBs situados en los dos lados de esos 6 PRBs, lo que significa que se utilizan 144 REs. Del mismo modo, la señal de sincronización secundaria (SSS) ocupa 144 REs.

Si se reducen los símbolos de control PDCCH, la capacidad aumentará. Por ejemplo, si hay dos símbolos PDCCH para un ancho de banda de canal de 1.4 MHz, los elementos de recursos de PDSCH aumentarán a 7716 REs/trama, y la capacidad en el esquema de modulación 64-QAM es igual a 4.63 Mbps. Y para un solo símbolo PDCCH, los elementos de recursos PDSCH son 8436 REs/trama y la capacidad en el esquema de modulación 64-QAM es igual a 5.06 Mbps.

Pero todos los bits calculados mencionados anteriormente no son totalmente bits de información, sino que también incluyen bits de información de redundancia con respecto al esquema de modulación y tasa de codificación asociado que depende de las condiciones de la señal. La tasa de modulación y codificación cambia según las condiciones del canal. En las mejores condiciones, se utilizará el MCS28 y no debería superar el 0.93, a menos que se utilice menos MCS en su lugar.

La tasa de codificación efectiva para un ancho de banda de canal de 1.4 MHz puede calcularse según la ecuación ECR. Donde el tamaño del bloque de transporte (TBS) para el enlace descendente (cuando IMCS (28) \equiv ITBS (26), $Q_m = 6$) es de 4392 bits y el número de elementos de recursos para PDSCH por bloque de recursos es de 126, respetando sólo los 3 símbolos de PDCCH.

$$ECR = \frac{4392 + 24}{6 * 6 * 126} = 0.9735 > 0.93$$

La tasa de codificación efectiva supera la tasa crítica, por lo que se utilizará el MCS27 en lugar del MCS28:

$$ECR = \frac{3752 + 24}{6 * 6 * 126} = 0.8324 < 0.93$$

El tamaño del bloque de transporte para el ancho de banda del canal de 3 MHz en la situación MCS28 es de 11064 bits y también se añadirán 24 bits, pero este tamaño es mayor que 6144 bits (6120 + 24 CRC), por lo que se segmenta en varios segmentos iguales o menores que 6120 y se añaden 24 bits para cada segmento. Por lo tanto, la tasa de codificación efectiva será igual a:

$$ECR = \frac{11064 + 24 + (2 * 24)}{6 * 15 * 126} = 0.9820 > 0.93$$

Además, el MCS28 será sustituido por el MCS27,

$$ECR = \frac{9528 + 24 + (2 * 24)}{6 * 15 * 126} = 0.8465 < 0.93$$

Por lo tanto, las tasas de datos máximas reales del enlace descendente en las mejores condiciones (teóricas) son las que se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1: Tasa de datos máxima real del enlace descendente LTE (3-PDCCH).

BW del canal [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
Número de segmentos ($\lceil \div 6120 \rceil$)	0	2	3	6	8	11
Velocidad de codificación efectiva	0.8324	0.8465	0.8431	0.8431	0.8307	0.8474
Velocidad de datos *(64QAM) [Mbps]	3.496	9.311	15.647	31.58	46.82	63.78

Elaborado por: Autor.

Si se reducen los símbolos PDCCH, ¿qué ocurrirá? Si se supone que sólo hay 2 símbolos para PDCCH y un ancho de banda de canal de 1.4 MHz,

$$ECR = \frac{4392 + 24}{6 * 6 * 138} = 0.8888 < 0.93$$

En esta situación, la tasa de codificación efectiva aumentó y también la tasa de datos máxima real del enlace descendente será igual a $4.63 * 0.8888 = 4.111$ Mbps. Sin embargo, para un símbolo PDCCH, la tasa de codificación efectiva disminuye como se muestra,

$$ECR = \frac{4392 + 24}{6 * 6 * 150} = 0.8177 < 0.93$$

Pero la velocidad máxima de datos del enlace descendente será mejor e igual a $5.06 * 0.8177 = 4.137$ Mbps, porque los elementos de recursos para PDSCH son más. La tabla 3.2 muestra la velocidad máxima de datos del enlace descendente para un símbolo PDCCH.

Tabla 3. 2: Tasa de datos máxima real del enlace descendente LTE (1-PDCCH).

BW del canal [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
Número de segmentos ([÷ 6120])	0	2	3	6	9	13
Velocidad de codificación efectiva	0.8177	0.8248	0.8192	0.8192	0.8192	0.8412
Velocidad de datos *(64QAM) [Mbps]	4.137	10.85	18.15	36.59	55.02	75.42

Elaborado por: Autor.

3.2.3. Capacidad del enlace ascendente.

Hay (2x7) símbolos de acceso múltiple por división de frecuencia con una sola portadora (SC-FDMA) en cada subtrama. Las señales de referencia de demodulación (DM-RS) para el canal compartido de enlace ascendente físico (PUSCH) están situadas en el cuarto símbolo de cada intervalo de tiempo y se extienden por todos los bloques de recursos, excepto los reservados por el canal de control de enlace ascendente físico (PUCCH) en los bordes del canal, mientras que la ubicación de las DM-RS para PUCCH dependerá del formato de PUCCH. Los PUCCH se transmiten en los bordes

del canal en varios formatos diferentes, en los que cada uno se asigna a dos ranuras (pares) que se encuentran en bordes de banda opuestos.

Esto significa que se reservará un bloque de recursos en cada borde para los formatos PUCCH conocidos como 2/2a/2b (CQI, PMI/RI y HARQ ACK/NACK), que tienen cinco símbolos de control por ranura y dos símbolos de referencia de demodulación. Mientras que los formatos 1/1a/1b (SR y HARQ ACK/NACK) utilizan cuatro símbolos de control por ranura y tres símbolos de referencia de demodulación, y su número varía dinámicamente en función del número de solicitudes de programación y acuses de recibo.

El eNodeB de la estación base también reserva 6 bloques de recursos (x2 ranuras) para las transmisiones del canal físico de acceso aleatorio (PRACH), y el último símbolo de ciertas tramas para la transmisión de señales de referencia de sondeo (SRS) según su periodicidad configurada. La tabla 3.3 muestra la velocidad de datos máxima real del enlace ascendente para diferentes anchos de banda del canal, respetando dos pares de RBs reservados para el formato PUCCH 2/2a/2b, excepto el ancho de banda de 1.4 MHz, en el que sólo se reserva un par de RBs.

Tabla 3. 3: Velocidad máxima real de datos en el enlace ascendente LTE.

BW del canal [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
TBS [bits] (para BW PRBs – 2)	3752	9523	16992	35160	55056	73712
Número de segmentos ($\lceil \div 6120 \rceil$)	0	2	3	6	9	13
Velocidad de codificación efectiva	0.8740	0.8547	0.8599	0.8518	0.8767	0.8745
Velocidad de datos *(64QAM) [Mbps]	3.39	9.15	16.63	35.13	54.83	73.58

Elaborado por: Autor.

3.2.4. Generación de tráfico para aplicaciones bajo demanda del cliente.

Para generar tráfico en OPNET, se utiliza el objeto de atributo “Application Definition”. Este atributo consiste en aplicaciones predefinidas

que pueden ser personalizadas según las demandas del usuario. En el atributo de definición de la aplicación, hay varias aplicaciones predefinidas, es decir, HTTP, correo electrónico, vídeo, FTP, voz, base de datos, etc., que pueden modificarse.

En este modelo de simulación se utiliza el atributo “Application Definition” que se muestra en la figura 3.2. La aplicación de voz se diseña configurando la voz como se ilustra en la figura 3.2. La aplicación VoIP utiliza el esquema de codificación G.711 y voz interactiva (6) como tipo de servicio para crear las llamadas VoLTE.

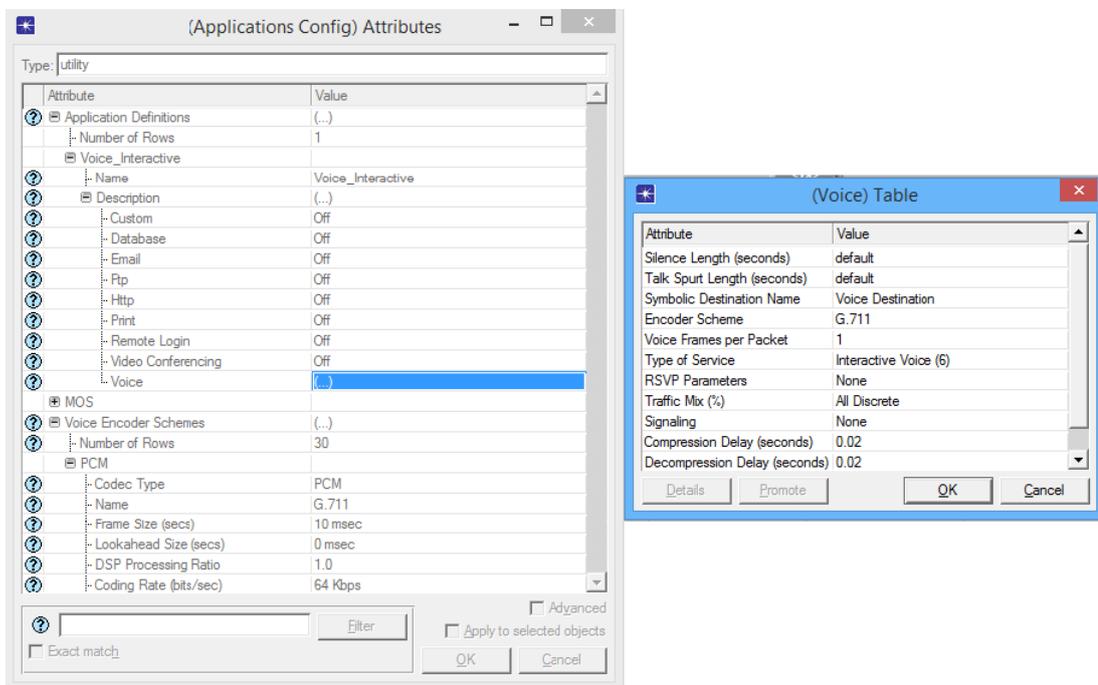


Figura 3. 2: Configuración de parámetros para la definición de la aplicación de voz.
Elaborado por: Autor.

Después de configurar la aplicación, es necesario configurar la definición de “Profile” (Perfil) donde se establece el comportamiento de la aplicación. La figura 3.3 muestra el atributo de Profile Definition que se utiliza en el modelo de red propuesto. Esto indica el tiempo de inicio de la simulación, que se establece en 120 s (tiempo de inicio [110] + offset [10]) y la aplicación VoLTE se repite continuamente cada 0.1 s hasta el final de la simulación. Se refiere a que las llamadas VoLTE se establecen entre el origen y el destino a partir de 120 s y las llamadas se añaden continuamente hasta el final de la simulación.

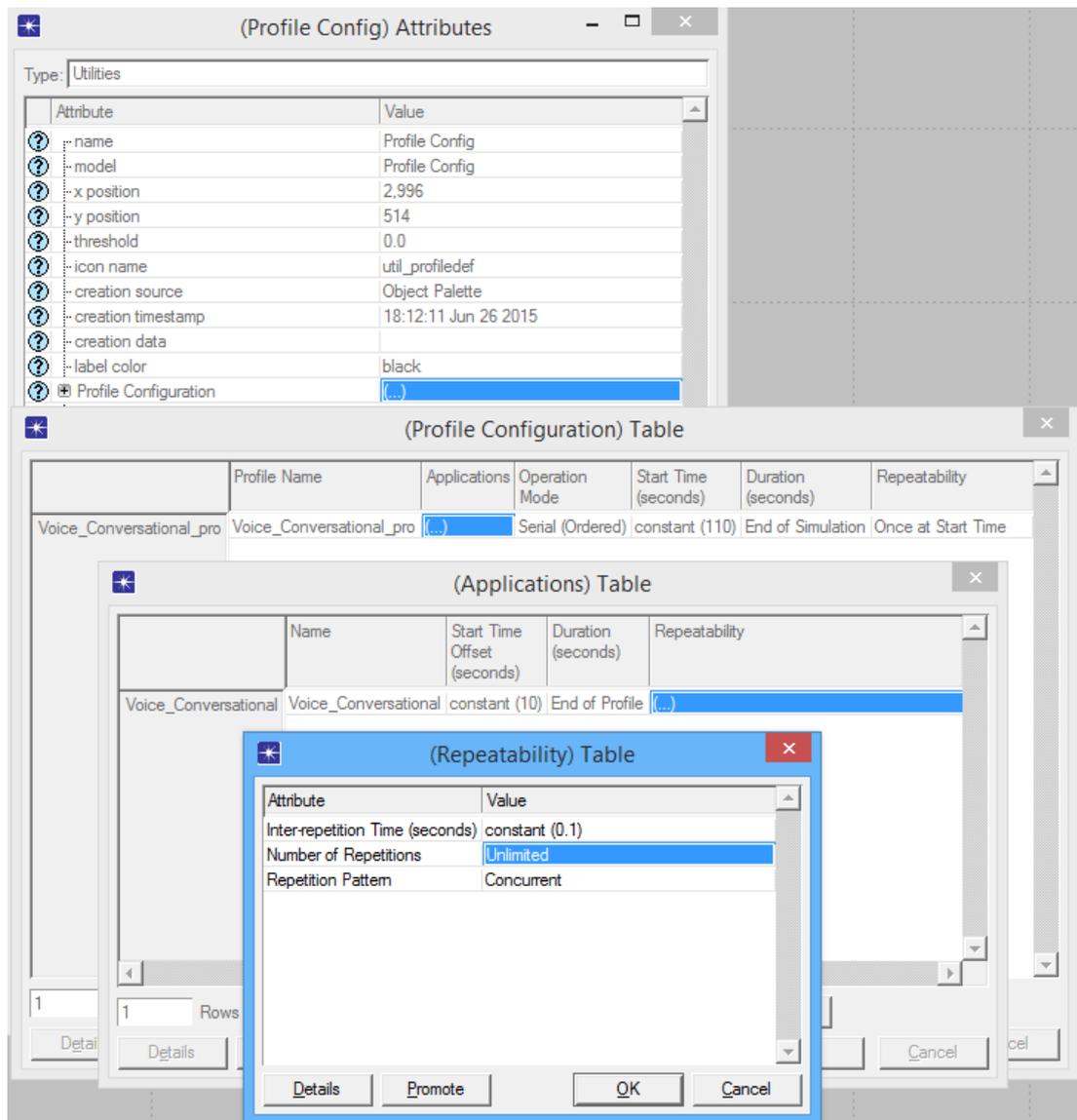


Figura 3. 3: Configuración de parámetros para la definición del perfil de voz.
Elaborado por: Autor.

En este escenario se genera un número ilimitado de llamadas VoLTE para evaluar la capacidad máxima de datos y el rendimiento. Por lo tanto, la definición del perfil se configura de forma que cada llamada VoLTE se añada después de un intervalo de tiempo fijo y el proceso de adición de la llamada sea continuo hasta el final de la simulación. La primera llamada VoLTE se establece en 120 s de la simulación, después de lo cual cada 100 ms se añade una llamada VoLTE a la red propuesta en el simulador Opnet Modeler.

La adición de llamadas VoLTE se prepara repitiendo la aplicación de voz cada 100 ms en la definición del perfil. Este procedimiento es continuo hasta

el final de la simulación. Por lo tanto, en este enfoque las llamadas VoLTE se incrementan continuamente en un intervalo fijo (100 ms) al modelo de red hasta que el eNodeB alcanza su capacidad máxima y después de eso los paquetes de los usuarios serán descartados. El tráfico VoLTE descrito anteriormente mediante la definición de la aplicación y la definición del perfil debe asignarse ahora a los equipos de usuario como se muestra en la figura 3.4.

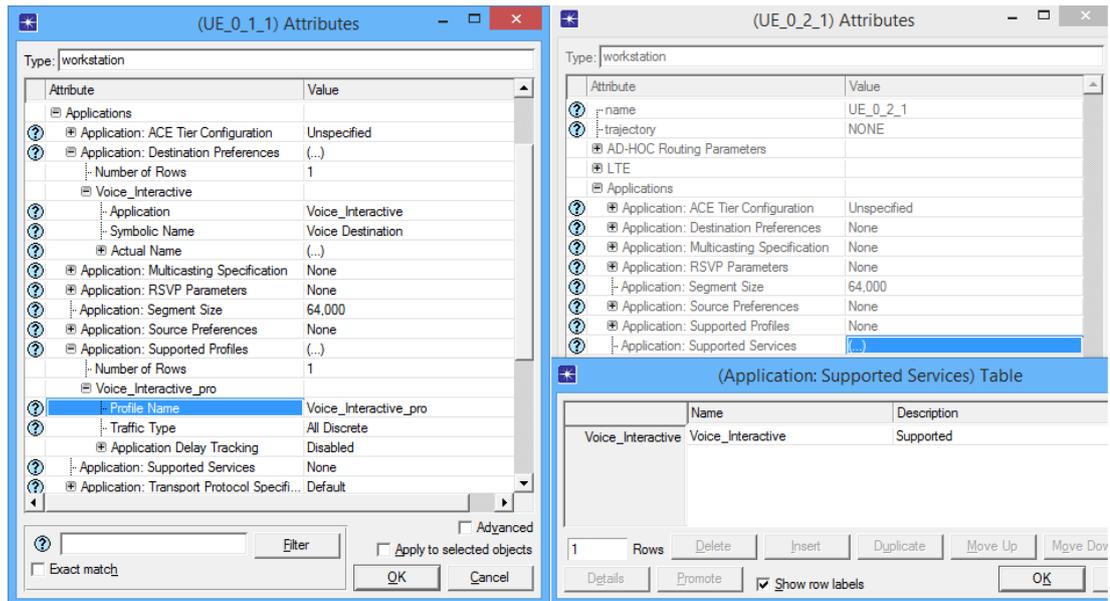


Figura 3. 4: Configuración de parámetros para la aplicación de voz en los UEs.
Elaborado por: Autor.

3.2.5. Análisis de resultados de la capacidad de canal de red LTE.

La red consta de un EPC, dos eNodeBs y un UE por eNodeB, tal y como se muestra en la figura 3.1. Durante la simulación se han utilizado los parámetros por defecto de OPNET para el modelo de red LTE propuesto, excepto los mencionados. El canal entre los nodos móviles y el eNodeB está configurado para ser un canal libre de errores, ya que el objetivo principal de este análisis es investigar el impacto del ancho de banda en la red de radio de acceso (se supone que todos los escenarios operan en las mejores condiciones).

Además, en estas simulaciones no se modelan el multitrayecto ni las interferencias. LTE admite un ancho de banda escalable, es decir, 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz. Para evaluar la capacidad máxima (MCS28 es sólo

considerable), se establecen 5 configuraciones de prueba diferentes para esos anchos de banda escalables (OPNET no admite PUCCH para 1.4 MHz).

La figura 3.5 muestra todos los parámetros generales utilizados en este escenario de simulación para el nodo de configuración de atributos LTE, el eNodeB y los nodos UE. Para cada prueba, se modifica el atributo "PHY Profile" en los eNodeBs para los cinco anchos de banda de los canales diferentes (3, 5, 10, 15, 20 MHz). La simulación se ejecuta en el modo de eficiencia "PHY Disabled" para que el índice MCS sea fijo (no cambie dinámicamente) durante la duración de la simulación.

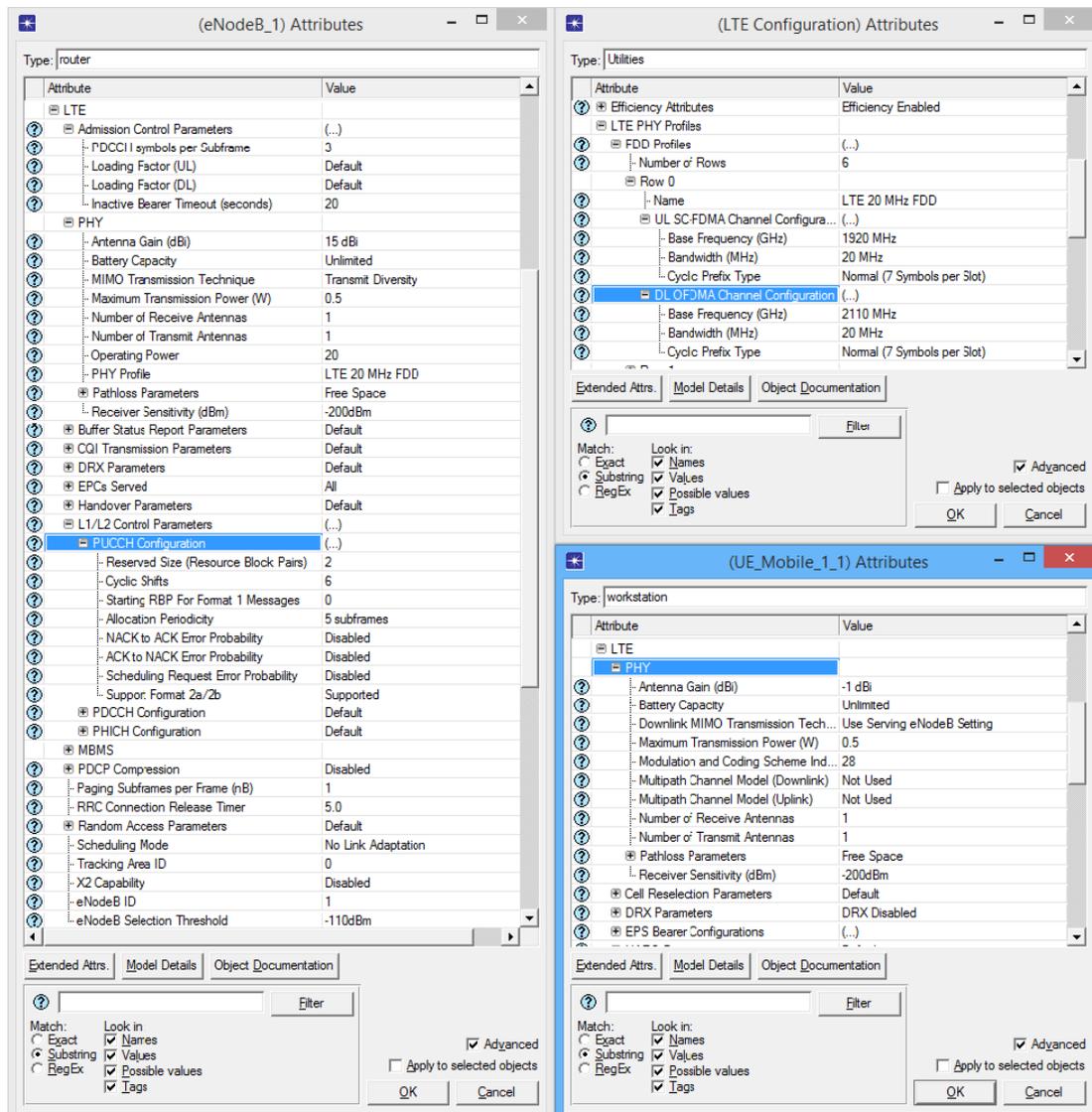


Figura 3. 5: Configuración de parámetros de la red LTE.

Elaborado por: Autor.

Las sobrecargas que se tienen en cuenta en el modelo LTE de OPNET son:

- configurar el número máximo reservado para PDCCH (3 símbolos por subtrama - Valor por defecto), variará dinámicamente según el número de usuarios controlados por el eNodeB.
- Se modelan las señales de referencia del enlace descendente (4 de recursos por RB).
- Se modelan PBCH, PSS y SSS.
- Se modelan las señales de referencia demoduladas del enlace ascendente (12 elementos de recursos por RB).
- Se configura el número máximo reservado para el PUCCH (2 pares de RB con 6 desplazamientos cíclicos para el formato 2/2a/2b que determina el número de usuarios controlados por el eNodeB - valor por defecto). El formato 1/1a/1b no está modelado.
- Se configura la señal PRACH (12 RBs por trama) para la segunda subtrama (Valor por defecto).
- No se modela el CRC.

Todas las aplicaciones en los escenarios de todas las simulaciones se inician después de 120 s de ejecutar la simulación (tiempo de inicio). Es el tiempo necesario para inicializar los paquetes, los búferes, las colas de mensajes, los circuitos y los distintos elementos del modelo. El inicio de la simulación es necesario para garantizar que la simulación haya alcanzado el estado estacionario antes de que comience la recogida de datos.

En este escenario, las llamadas VoLTE se incrementan de forma continua a intervalos fijos (100 ms) al modelo de red hasta que el eNodeB alcanza su capacidad máxima y después los paquetes de los usuarios se caen. Como era de esperar, la configuración de eNodeB, que tiene el menor ancho de banda, 3 MHz, tiene la menor tasa de recepción de tráfico (enlace ascendente) y de envío (enlace descendente), mientras que con 20 MHz se consiguen las tasas más altas. Las direcciones del enlace ascendente y del enlace descendente están en función del UE. La figura 3.6 muestra la capacidad máxima de datos en el enlace ascendente y descendente,

respectivamente, para los diferentes anchos de banda de canal de 3, 5, 10, 15 y 20 MHz, respetando la tasa de modulación y codificación MCS28. Esta capacidad representa los datos enviados y recibidos en la capa MAC en el eNodeB después de eliminar (enlace ascendente) o antes de añadir (enlace descendente) la sobrecarga de control de radio y los bits de redundancia de codificación en la capa física.

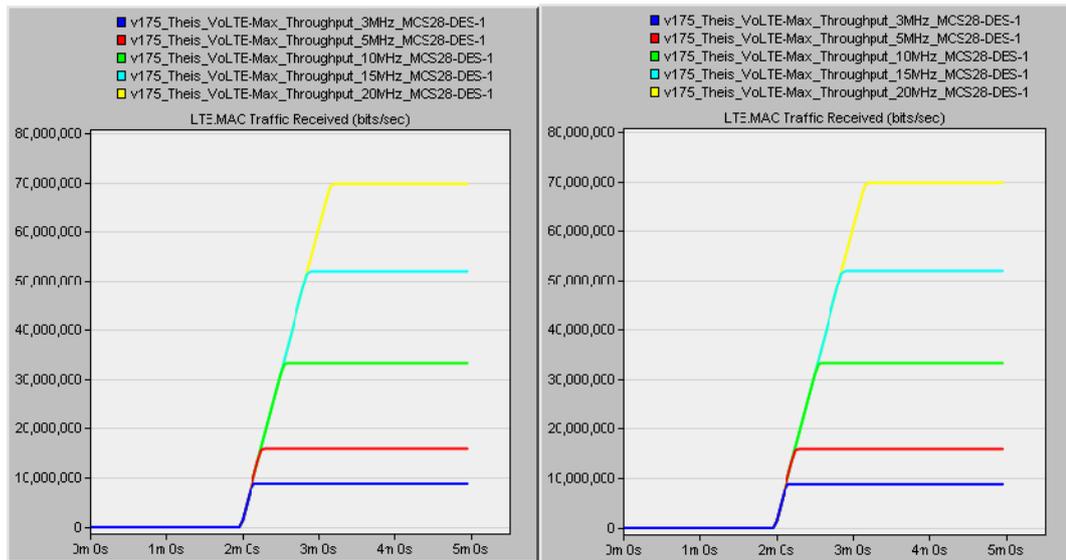


Figura 3. 6: Capacidad máxima del enlace ascendente y descendente, respectivamente, en la red MAC.

Elaborado por: Autor.

Está claro que el tráfico recibido y enviado son idénticos entre sí. Sin embargo, la figura 3.7 muestra, por ejemplo, que en 10MHz el porcentaje de utilización de PDSCH (90.76%) es menor que el de PUSCH (95%), lo que significa que hay elementos de recursos en el enlace descendente que están vacíos y disponibles para el envío. Esto se debe a que el tráfico de enlace ascendente generado por los usuarios de voz G.711 en los dos lados de la red es idéntico al de voz bidireccional (64 Kbps para cada usuario en el enlace descendente y en el ascendente).

Y para las comunicaciones punto a punto, cuando el lado del enlace ascendente tiene menos capacidad que el lado del enlace descendente, todo el tráfico pasa del emisor al receptor a través de la red sin que se pierdan paquetes y también queda espacio vacío en el lado de recepción, pero cuando el lado del enlace ascendente tiene más capacidad se pierden algunos paquetes y el lado de recepción estará lleno. El enlace descendente en el

sistema LTE siempre tiene una gran capacidad para soportar aplicaciones que necesitan una pequeña capacidad de enlace ascendente y una gran capacidad de enlace descendente, como el FTP y el streaming de vídeo.

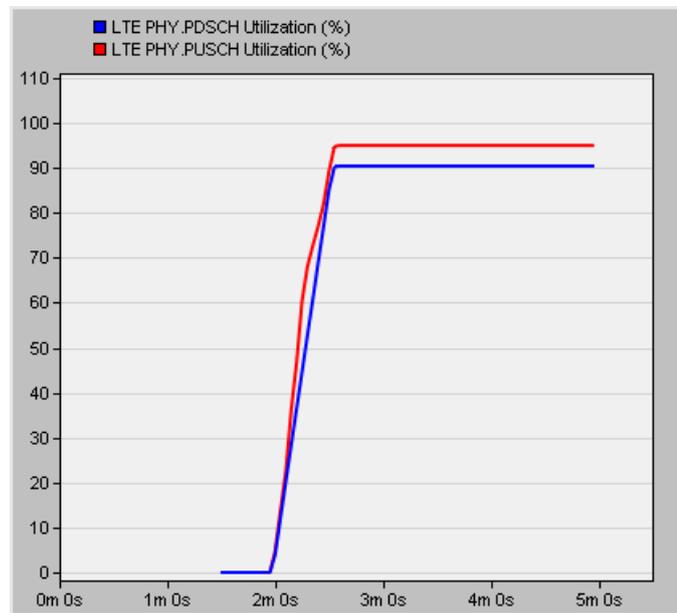


Figura 3. 7: Transferencia de datos para la utilización de PDSCH y PUSCH para una capacidad máxima de 10 MHz.

Elaborado por: Autor.

La cantidad de paquetes de datos que se entregan con éxito desde el emisor (capa de aplicación) al receptor (capa de aplicación) a través de una red de comunicación se conoce como rendimiento y se da en unidad de bits o bps. El rendimiento con una tasa máxima suele ser una preferencia absoluta en cada sistema. La figura 3.8 muestra el rendimiento para los diferentes anchos de banda del canal cuando se utiliza el códec de voz G.711. La capacidad de usuario se calcula dividiendo el caudal por la velocidad de datos del códec de voz (64 Kbps). El porcentaje de rendimiento es el resultado de dividir el rendimiento por la capacidad total del canal.

La tabla 3.4 muestra los valores de la capacidad máxima para el enlace ascendente y descendente, así como la utilización de PDSCH y PUSCH, el caudal y la capacidad de usuario para los cinco anchos de banda diferentes. Según la tabla 3.4, el rendimiento máximo, en las mejores condiciones, es de unos 45.15 Mbps (44.79%) cuando se utiliza un ancho de banda de canal de 20 MHz. Por lo tanto, se utiliza más del 55% de sobrecarga para el protocolo,

el control de radio y los bits de redundancia, y esto es decepcionante, porque en las redes reales no todos los usuarios trabajan en las mejores condiciones, lo que significa más bits de redundancia y menos rendimiento.

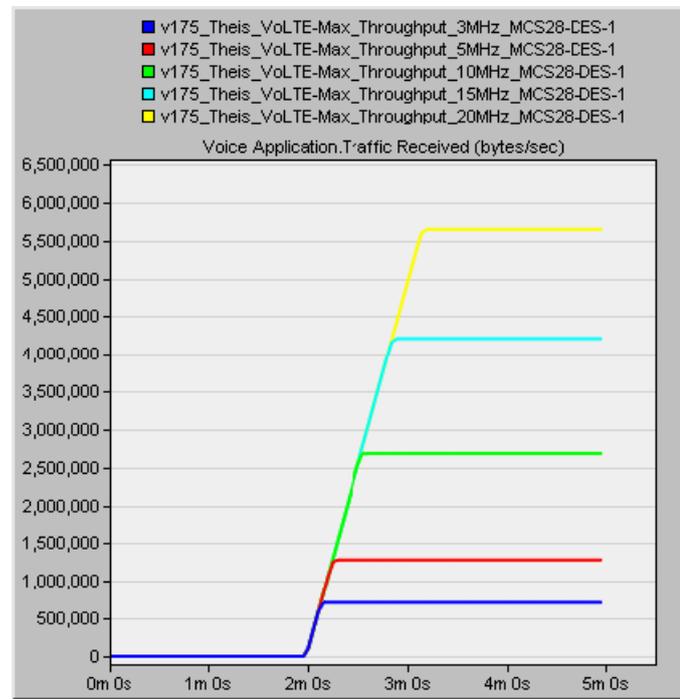


Figura 3. 8: Rendimiento máximo (capa de aplicación) en bytes para diferentes anchos de banda de canal para la aplicación de VoLTE.

Elaborado por: Autor.

Tabla 3. 4: Resumen de los resultados obtenidos para el escenario 1.

BW del canal [MHz]	3	5	10	15	20
Capacidad uplink [Mbps]	8.796	15.892	33.170	51.999	69.741
Utilización de PUSCH [%]	94.28	94.70	95	94.92	95
Capacidad downlink [Mbps]	8.797	15.895	33.171	52.007	69.742
Utilización PDSCH [%]	86.25	87.42	90.76	93.49	93.81
Rendimiento [Mbps]	5.671	10.268	21.460	33.657	45.150
Porcentaje de rendimiento [%]	37.50	40.74	42.57	44.51	44.79
Capacidad de usuario para voz	88	160	335	525	705

Elaborado por: Autor.

3.3. Descripción del escenario de simulación 2: esquema de modulación y codificación.

En las redes del mundo real, los usuarios no trabajan en las mismas condiciones como consecuencia de la distancia entre el eNodeB y los UEs, la

pérdida de señal, la movilidad, el desvanecimiento, etc. Teniendo en cuenta el informe sobre el estado del canal enviado por los equipos de usuario al eNodeB en los mensajes CQI, el eNodeB proporcionará diferentes esquemas de modulación y tasa de codificación para cada usuario en función de sus condiciones. Las condiciones del canal son tanto peores cuanto menos orden de modulación o más bits de redundancia se utilicen.

Por otro lado, las condiciones del canal son tanto mejores cuanto más alto sea el orden de modulación o menos bits de redundancia se utilicen. Los bits de redundancia se utilizan para detectar y corregir errores en el lado de recepción. En este escenario, se realizan 7 pruebas o iteraciones para simular diferentes condiciones que están representadas por diferentes MCS.

Para estudiar el efecto de las condiciones del canal o de los MCS, se supone que cada iteración tiene un valor MCS diferente en el que todos los usuarios de trabajan en la misma condición. Se considera la configuración de las pruebas para los esquemas de modulación y tasa de codificación MCS0, MCS4, MCS9, MCS15, MCS20, MCS24 y MCS28. Los cálculos matemáticos para estos esquemas se explican a continuación:

- Por ejemplo, para calcular la tasa de codificación efectiva para el enlace descendente utilizando la ecuación ECR en situación MCS20 respetando 1 símbolo de control PDCCH:

$$ECR = \frac{9912 + 24 + (2 * 24)}{6 * 25 * 150} = 0.4437 < 0.93$$

- Y para el enlace ascendente respetando 2 pares de PUCCH RBs:

$$ECR = \frac{9912 + 24 + (2 * 24)}{4 * 23 * 144} = 0.7536 < 0.93$$

Para simular diferentes esquemas MCS en el simulador Opnet, se utiliza la red diseñada en el escenario 1, donde el atributo "Perfil PHY" en los nodos eNodeB es de 5 MHz para las 7 pruebas. Para cada prueba, el atributo el índice de MCS en los nodos UE se modifica para los valores 0, 4, 9, 15, 20, 24 y 28, tal como se ilustra en la figura 3.9.

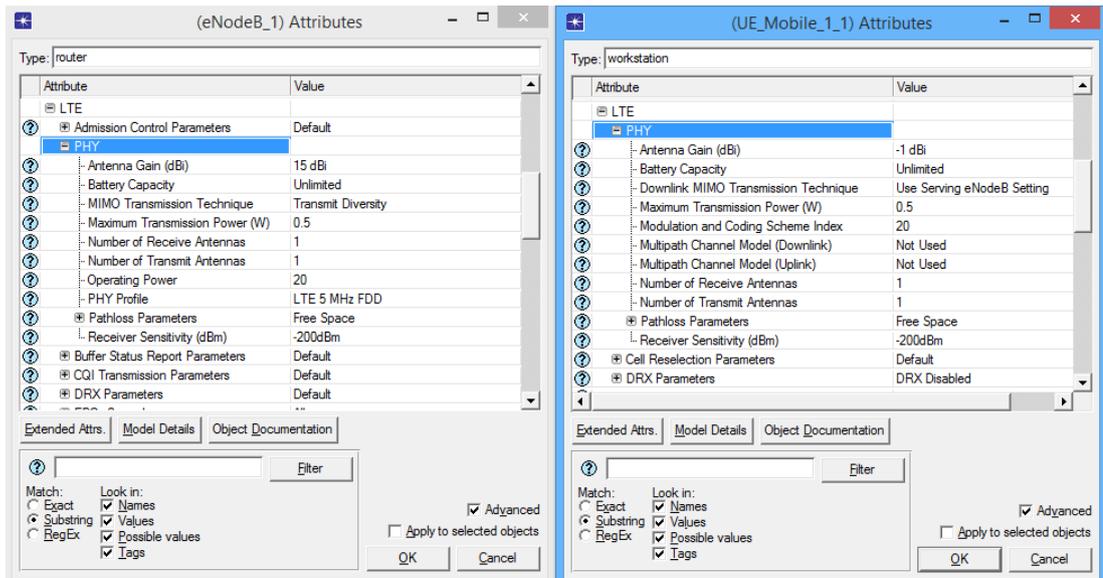


Figura 3. 9: Configuración de parámetros de los esquemas MCS para un ancho de banda de 5 MHz.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.10 muestra la capacidad máxima del enlace ascendente y descendente para un ancho de banda de 5 MHz, respectivamente, donde son idénticas entre sí debido a la misma razón mencionada en el escenario (1). Es evidente que la capacidad máxima se alcanza cuando se utiliza el esquema MCS28 para todos los usuarios, con un valor de unos 15.89 Mbps.

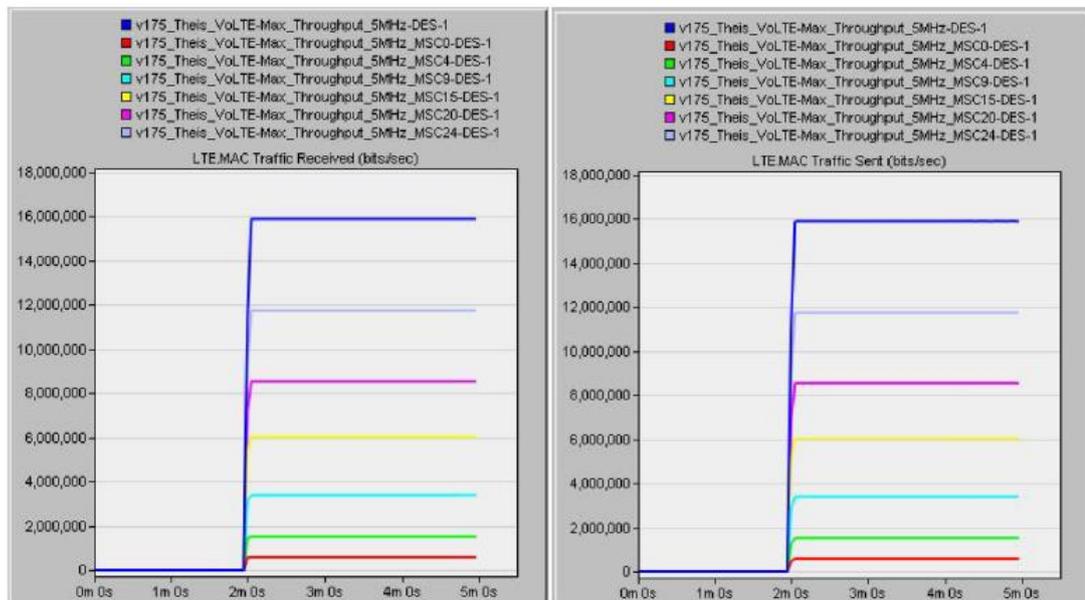


Figura 3. 10: Capacidad máxima de enlace ascendente y descendente en la capa MAC para 5MHz en diferentes esquemas MCS.

Elaborado por: Autor.

Por otro lado, cuando el canal está en las peores condiciones para todos los usuarios y se utiliza MCS0, la capacidad da el valor mínimo con un valor de unos 0.57 Mbps. La figura 3.11 ilustra el rendimiento alcanzado en los 7 esquemas MCS diferentes y, a continuación, la capacidad de usuario puede calcularse dividiendo el rendimiento por la velocidad de datos de voz. Los valores máximos de todos los resultados y la capacidad de usuario se muestran en la tabla 3.5.

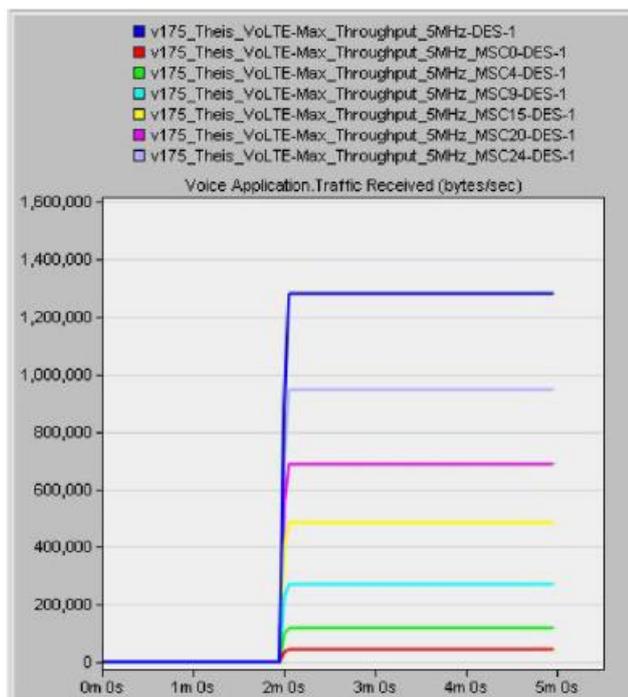


Figura 3. 11: Rendimiento máximo para la red LTE a 5 MHz en diferentes esquemas MCS.

Elaborado por: Autor.

Tabla 3. 5: Resumen de los resultados obtenidos para el escenario 2.

Índice de MCS	0	4	9	15	20	24	28
Capacidad uplink [Mbps]	0.575	1.502	3.386	6.038	8.540	11.744	15.892
Capacidad downlink [Mbps]	0.573	1.506	3.385	6.039	8.545	11.747	15.895
Rendimiento [Mbps]	0.351	0.946	2.167	3.884	5.506	7.581	10.268
Porcentaje de rendimiento [%]	1.39%	3.75%	8.59%	15.41%	21.84%	30.08%	40.74%
Capacidad de usuario para voz	5	14	33	60	86	118	160

Elaborado por: Autor.

Conclusiones

1. En la fundamentación teórica se presentaron los conceptos generales de las redes móviles y su evolución y las diferentes infraestructuras 2G, 3G y 4G, así como sus funcionalidades y características, y las soluciones previstas para garantizar la cobertura y calidad de servicio esperadas
2. Este trabajo de examen complejo analizó el impacto del ancho de banda del canal, la condición del canal en la transmisión de voz a través de LTE. Se observa que la capacidad del sistema aumenta al incrementar el ancho de banda del canal. Sin embargo, la capacidad del sistema y el rendimiento se degradan por las malas condiciones del canal, donde el orden de modulación y/o los bits de datos se reducen y los bits de redundancia se incrementan de acuerdo con los mensajes CQI de los UEs a la estación base eNodeB.
3. Como las condiciones del canal de radio son mejores, la capacidad y el rendimiento del sistema mejoran y aumentan. La voz no tiene un mal rendimiento cuando la red LTE no está sobrecargada. Sin embargo, la voz sufre pérdida de paquetes y un retraso inaceptable de extremo a extremo cuando la red está congestionada.

Recomendaciones

1. Análisis y visión general del sistema MIMO masivo en redes 4G-LTE y 5G.
2. Estudio de sistemas de radio sobre fibra para aplicaciones de redes domésticas de banda milimétrica

Bibliografia

- Castellanos, G. (2012). *Wireless Communication Network Architecture for the Smart Grid applications*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35672.29444>
- Chen, Y., Bayesteh, A., Wu, Y., Ren, B., Kang, S., Sun, S., Xiong, Q., Qian, C., Yu, B., Ding, Z., Wang, S., Han, S., Hou, X., Lin, H., Visoz, R., & Razavi, R. (2018). Toward the Standardization of Non-Orthogonal Multiple Access for Next Generation Wireless Networks. *IEEE Communications Magazine*, 56(3), 19–27. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700845>
- Ghassan, A. A. (2014). Queue size comparison for standard transmission control protocol variants over high-speed traffics in long term evolution advanced (LTE-A) network. *Scientific Research and Essays*, 9(23), 984–987. <https://doi.org/10.5897/SRE2014.6133>
- Gobbo, N., Merlo, A., & Migliardi, M. (2013). A Denial of Service Attack to GSM Networks via Attach Procedure. En A. Cuzzocrea, C. Kittl, D. E. Simos, E. Weippl, & L. Xu (Eds.), *Security Engineering and Intelligence Informatics* (Vol. 8128, pp. 361–376). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40588-4_25
- Gutierrez, A., Rangel, V., Gomez, J., Edwards, R. M., & Covarrubias, D. H. (2020). A Joint Modulation-Coding Scheme and Resource Allocation in LTE Uplink. *Elektronika Ir Elektrotechnika*, 26(5), 50–58. <https://doi.org/10.5755/j01.eie.26.5.22313>

- Hao Yang, Ricciato, F., Songwu Lu, & Lixia Zhang. (2006). Securing a Wireless World. *Proceedings of the IEEE*, 94(2), 442–454.
<https://doi.org/10.1109/JPROC.2005.862321>
- Schäfer, G., Festag, A., & Karl, H. (2001). *Current Approaches to Authentication in Wireless and Mobile Communications Networks* [Technical Report].
https://www.researchgate.net/publication/2388978_Current_Approaches_to_Authentication_in_Wireless_and_Mobile_Communications_Networks
- Siba, A. (2012). *Conception et réalisation d'une plateforme de gestion d'un réseau de transport*.
<https://www.semanticscholar.org/paper/Conception-et-r%C3%A9alisation-d%E2%80%99une-plateforme-de-d%E2%80%99un-Siba/5092fbefbc4b19464b466262092788abfb4ef8cc6>
- Unitec. (2020). *La 5G, une rupture technologique*. Unitec.
<https://www.unitec.fr/la-5g-une-rupture-technologique/>
- Wang, Y., & Abdelhadi, A. (2015). Optimal Power Allocation for LTE Users with Different Modulations. *arXiv:1507.07159 [cs]*.
<http://arxiv.org/abs/1507.07159>

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Erazo Pineda, Eddie Wider** C.C: # 091872277-8 autor del trabajo de titulación: Implementación del esquema de modulación/codificación y capacidad en sistemas LTE utilizando herramienta de simulación Opnet, 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, 3 de diciembre del 2021

f. _____

Nombre: **Erazo Pineda, Eddie Wider**

C.C: 091872277-8

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA			
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN			
TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Implementación del esquema de modulación/codificación y capacidad en sistemas LTE utilizando herramienta de simulación Opnet		
AUTOR(ES)	Erazo Pineda, Eddie Wider		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	M. Sc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio; M. Quezada Calle, Edgar Raúl / M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Sistema de Posgrado		
PROGRAMA:	Maestría en Telecomunicaciones		
TITULO OBTENIDO:	Magister en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	Guayaquil, 3 de diciembre del 2021	No. DE PÁGINAS:	54
ÁREAS TEMÁTICAS:	Comunicaciones Inalámbricas, Redes de Sensores		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Comunicaciones, Modulación, Codificación, Capacidad, Canales, Ancho de banda		
RESUMEN/ABSTRACT:	<p>La demanda de ancho de banda (BW) en la comunicación móvil crece exponencialmente día a día ya que el número de usuarios ha aumentado drásticamente en los últimos años. La tecnología LTE se ha consolidado en las redes celulares de banda ancha celular debido al continuo aumento de la demanda de datos de alta velocidad. El presente documento presenta el estudio de la implementación del esquema de modulación/codificación y capacidad de canales en sistemas LTE utilizando la herramienta de simulación Opnet. En el capítulo 1, se presenta las generalidades del proyecto de examen complejo y en donde se exponen el objetivo general y los objetivos específicos de la investigación. En el capítulo 2, representa la descripción teórica de los sistemas de comunicaciones móviles desde la primera hasta la cuarta generación de telefonía móvil. En el capítulo 3, se presenta los escenarios de simulación del modelo de la red LTE propuesto en el software de simulación Opnet, utilizando esquemas de modulación y codificación.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593982328141	E-mail: eddie.erazo.7@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):			