



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

**TEMA:**

**Análisis de desempeño del servicio de voz sobre redes LTE (VoLTE) mediante  
el uso de indicadores claves de rendimiento (KPI)**

**AUTOR:**

Ing. Molina Villalta, Kathiuska Alexandra

Trabajo de titulación previo a la obtención del Grado Académico de  
**Magister 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 la Magíster **Molina Villalta, Kathiuska Alexandra** como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de **MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**.

**TUTOR**

**M. Sc. Edwin Fernando Palacios Meléndez**

**DIRECTOR DEL PROGRAMA**

**M. Sc. Manuel Romero Paz**

Guayaquil, 3 de diciembre del 2021



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

**Yo, Molina Villalta, Kathiuska Alexandra**

DECLARÓ QUE:

El trabajo de Titulación “**Análisis de desempeño del servicio de voz sobre redes LTE (VoLTE) mediante el uso de indicadores claves de rendimiento (KPI)**” 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 trabajo de Titulación del Grado Académico en mención.

Guayaquil, 3 de diciembre del 2021

EL AUTOR

---

Ing. Molina Villalta, Kathiuska Alexandra



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

**AUTORIZACIÓN**

**Yo, Molina Villalta, Kathiuska Alexandra**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación**, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación “**Análisis de desempeño del servicio de voz sobre redes LTE (VoLTE) mediante el uso de indicadores claves de rendimiento (KPI)**” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 3 de diciembre del 2021

EL AUTOR

Ing. Molina Villalta, Kathiuska Alexandra

# REPORTE DE URKUND

The screenshot shows the URKUND interface. On the left, document details are displayed: 'Documento: Tesis Kathiuska Molina.docx (D119651003)', 'Presentado: 2021-11-23 14:21 (-05:00)', 'Presentado por: fernandopm23@hotmail.com', 'Recibido: edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com', and 'Mensaje: Revisión trabajo de titulación Kathiuska Molina. Mostrar el mensaje completo. 4% de estas 46 páginas, se componen de texto presente en 8 fuentes.' On the right, a 'Lista de fuentes' table is visible with columns 'Categoría' and 'Enlace/nombre de archivo'. The table lists several sources, including links to digital repositories and a PDF file named '7648 baltazar\_aa.pdf'. At the bottom, there are navigation icons and a status bar showing '1 Advertencias', 'Reiniciar', and 'Compartir'.

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

TEMA: Análisis de desempeño del servicio de voz sobre redes  
LTE (VoLTE) mediante el uso de indicadores claves de  
rendimiento (KPI)

AUTOR: Ing. Molina Villalta, Kathiuska Alexandra

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

TUTOR: M. Sc. Palacios Meléndez Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

17 de Julio del 2021

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

CERTIFICACION Certificamos que el presente trabajo fue

## **Agradecimientos**

A Dios por estar siempre a mi lado, guiándome en cada paso que doy y en cada decisión que tomo, por fortalecer mi corazón y por haber colocado en mi vida aquellas personas que han sido mi compañía y soporte durante todo mi crecimiento académico. A mis abuelos, Beatriz Duarte Alvarado y Pedro Villalta Jordán por ser los pilares más importantes de mi vida.

A la familia Villalta Duarte, por creer en mí y siempre brindarme su apoyo incondicional y paciencia, gracias por saber comprenderme hasta en mis peores momentos, todo esto se lo debo a ustedes.

Mis más sinceros agradecimientos a mis amigos y profesores M. Sc. Manuel Romero P. y M. Sc. Edwin Palacios M., personas que admiro y aprecio con todo el corazón, por su inteligencia y conocimientos, gracias por compartir su tiempo, dedicación, esfuerzo y consejos.

Gracias a todos, porque en esta armonía grupal lo hemos logrado.

Ing. Molina Villalta, Kathiuska Alexandra

## **Dedicatoria**

La concepción de este proyecto está dedicada a mis abuelos Beatriz Ursulina Duarte Alvarado y Pedro Antonio Villalta Jordán, pilares fundamentales de mi vida. Sin ellos jamás hubiese podido alcanzar lo que hasta ahora. Su fortaleza de espíritu y la entereza de su carácter hicieron de ellos mi más grande ejemplo a seguir y destacar, me enseñaron no sólo a luchar arduamente por mis sueños, sino que lo más importante en la vida es vivirla con integridad y no dar la impresión de ser alguien que no eres, que se debe vivir la vida como una persona honesta y compasiva para poder contribuir de alguna manera. Los amo abuelitos, están en mi corazón, gracias por todo.

Ing. Molina Villalta, Kathiuska Alexandra



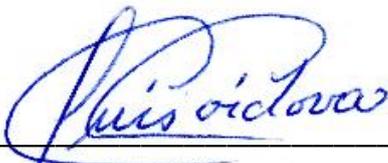
**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. 

**MSc. PALACIOS MELÉNDEZ EDWIN FERNANDO**  
TUTOR

f. 

**MSc. CÓRDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO**  
REVISOR

f. 

**MSc. QUEZADA CALLE, EDGAR RAUL**  
REVISOR

f. 

**MSc. ROMERO PAZ MANUEL DE JESÚS**  
DIRECTOR DEL PROGRAMA

## INDICE

ÍNDICE FIGURAS .....	XI
ÍNDICE DE TABLAS .....	XIII
Resumen.....	XIV
Abstract .....	XV
CAPÍTULO I: MARCO CONTEXTUAL .....	2
1.1.    Introducción .....	2
1.2.    Antecedentes .....	4
1.3.    Definición del problema.....	5
1.4.    Justificación.....	6
1.5.    Objetivos .....	7
1.5.1.    Objetivo General .....	7
1.5.2.    Objetivos Específicos.....	7
1.6.    Hipótesis.....	7
1.7.    Metodología .....	7
CAPITULO II: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	9
2.1.    Arquitectura genérica de los sistemas celulares.....	9
2.2.    Arquitectura general de los sistemas 3GPP .....	11
2.3.    Introducción al estándar LTE.....	12
2.3.1.    Objetivos de LTE (Morales, 2015) .....	13
2.3.2.    Características técnicas del sistema LTE. ....	14
2.4.    Estructura de red LTE .....	14
2.4.1.    Arquitectura del sistema LTE .....	14
2.4.2.    E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access) .....	15
2.4.3.    E-NodeB (Evolved Node B) .....	17
2.4.4.    EPC (Evolved Packet Core).....	18
2.4.5.    Arquitectura de protocolos para LTE.....	22
2.5.    Tecnologías propias de LTE .....	28
2.5.1.    OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex).....	28
2.5.2.    OFDMA .....	29
2.5.3.    SC-FDMA.....	31

2.6.	IMS (Subsistema Multimedia IP) .....	32
2.6.1.	Características principales de IMS (Morales, 2015) .....	32
2.6.2.	Estructura del subsistema IMS .....	33
2.6.3.	Arquitectura IMS .....	34
2.6.4.	Protocolos en IMS (Lara & Coral, 2017).....	41
2.7.	Voz sobre LTE (VoLTE) .....	45
2.7.1.	Definición.....	45
2.7.2.	Ventajas y Desventajas de VoLTE .....	46
2.7.3.	Estructura de VoLTE .....	47
2.7.4.	IMS en VoLTE.....	49
<b>CAPITULO III: ANÁLISIS DE QoS y QoE PARA EL SERVICIO DE VoLTE</b>		<b>50</b>
3.1.	Calidad de servicio conceptos generales.....	50
3.2.	Calidad de servicio (QoS) en LTE .....	51
3.3.	Parámetros de QoS en LTE (Fortún, 2017) .....	52
3.4.	Requerimientos de calidad de servicio en redes VoLTE .....	54
3.4.1.	QoS aplicada en redes VoLTE (Fortún, 2017) .....	55
3.5.	Análisis de la plataforma de simulación Opnet Modeler .....	56
3.6.	Implementación de simulación de LTE .....	58
3.7.	Diseño del escenario de simulación QoS en la red LTE propuesta. ....	58
3.8.	Análisis de resultados de simulación de QoS en la red LTE. ....	60
Conclusiones .....		67
Recomendaciones.....		68
Referencias Bibliográficas .....		69

## ÍNDICE FIGURAS

Figura 2. 1 Arquitectura genérica de un sistema celular .....	9
Figura 2. 2 Estructura general de la tarjeta inteligente UICC .....	9
Figura 2. 3 Arquitectura general de los sistemas 3GPP .....	11
Figura 2. 4 Arquitectura del Sistema LTE .....	15
Figura 2. 5 Arquitectura E-UTRAN.....	16
Figura 2. 6 Bearers LTE: Radio Bearer .....	17
Figura 2. 7 Arquitectura básica del EPC y sus interfaces .....	18
Figura 2. 8 Stack de Protocolos LTE-EPC.....	27
Figura 2. 9 SC-FDMA y OFDMA en LTE.....	28
Figura 2. 10 Representación de la frecuencia vs tiempo de una señal OFDM .....	29
Figura 2. 11 Diagrama de bloques de un Sistema OFDMA .....	30
Figura 2. 12 Bloque de recursos físicos (PRB) para diferentes anchos de banda en LTE .....	30
Figura 2. 13 Parámetros de modulación para OFDMA de enlace descendente en LTE .....	31
Figura 2. 14 Modelo de provisión de servicios en base al subsistema IMS. ....	34
Figura 2. 15 Arquitectura simplificada del Subsistema IMS .....	41
Figura 2. 16 Entidades SIP.....	42
Figura 2. 17 Estructura simplificada de VoLTE .....	47
Figura 2. 18 Arquitectura lógica de VoLTE .....	48
Figura 2. 19 Subsistema IMS para VoLTE.....	49
Figura 3. 1: Esquema de contribuciones a la QoS de extremo a extremo.....	50
Figura 3. 2: Parámetros de QoS en el sistema LTE .....	53
Figura 3. 3: Estructura del entorno de simulación Opnet Modeler.....	57
Figura 3. 4: Implementación del modelo de red LTE.....	58
Figura 3. 5: Configuración de los parámetros de aplicaciones y perfiles para desplegar QoS.....	60
Figura 3. 6: Tráfico enviado/recibido y retardo extremo a extremo en condiciones normales de carga.....	62
Figura 3. 7: Tráfico enviado/recibido y retardo extremo a extremo en condiciones de congestionamiento.....	62

Figura 3. 8: Tráfico enviado/recibido y retardo extremo a extremo en condiciones de congestión con QoS.....	64
Figura 3. 9: Tráfico enviado/recibido y retardo extremo a extremo en condiciones de congestión con QoS con mayor cantidad de llamadas. ....	64
Figura 3. 10: Tráfico enviado/recibido y retardo extremo a extremo en condiciones de congestión con QoS con mayor cantidad de llamadas. ....	65
Figura 3. 11: Tráfico enviado/recibido y retardo extremo a extremo en condiciones de congestión con QoS con mayor cantidad de llamadas. ....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Métricas y sus características técnicas en LTE.....	14
Tabla 2. 2 Función de las entidades que conforman el EPC y sus interfaces. ....	22
Tabla 2. 3 Clases de peticiones SIP .....	42
Tabla 2. 4 Clases de respuestas SIP .....	43
Tabla 3. 1 QCI estandarizados en LTE .....	53
Tabla 3. 2 Parámetros de MOS y percepción de QoS por el usuario final .....	56
Tabla 3. 3 Configuración de asignación de portadores EPS a ToS IP .....	61
Tabla 3. 4 Características estandarizadas del QCI.....	63

## **Resumen**

El uso generalizado de dispositivos móviles inteligentes en los últimos tiempos ha revelado la necesidad de altas velocidades de datos en las comunicaciones móviles. Para satisfacer esta necesidad, se desarrolló la tecnología Evolución a Largo Plazo (LTE), una de las tecnologías de comunicación de cuarta generación y para permitir la comunicación móvil celular con un mayor rendimiento. En comparación con los sistemas celulares anteriores, la arquitectura de red de radio de LTE está diseñada para simplificar las operaciones, reducir los costos y permitir la comunicación celular a velocidades más altas y eficiencia espectral. Gracias a las altas capacidades, alta velocidad de datos, alta eficiencia espectral y baja latencia que ofrece LTE, que se define como una interfaz de radio flexible por 3GPP; la convergencia digital se logra llevando el tráfico de voz, video y datos de un extremo a otro con paquetes IP. Por lo tanto, en el presente documento del trabajo de titulación se propone el “Análisis de desempeño del servicio de voz sobre redes LTE (VoLTE) mediante el uso de indicadores claves de rendimiento (KPI)”.

**Palabras Claves:** Redes, Arquitectura, Radio, Voz, LTE, 3GPP

## **Abstract**

The widespread use of smart mobile devices in recent times has revealed the need for high data speeds in mobile communications. To meet this need, Long Term Evolution (LTE) technology, one of the fourth-generation communication technologies, was developed to enable higher performance cellular mobile communication. Compared to previous cellular systems, LTE's radio network architecture is designed to simplify operations, reduce costs, and enable cellular communication at higher speeds and spectral efficiency. Thanks to the high capacities, high data speed, high spectral efficiency and low latency offered by LTE, which is defined as a flexible radio interface by 3GPP; digital convergence is achieved by moving voice, video and data traffic from one end to the other with IP packets. Therefore, in the present document of the degree work the "Performance analysis of voice service over LTE networks (VoLTE) through the use of key performance indicators (KPI)" is proposed.

**Keywords:** Networks, Architecture, Radio, Voice, LTE, 3GPP

## CAPÍTULO I: MARCO CONTEXTUAL

En este capítulo se desarrolla la introducción a este trabajo de investigación, presentando los antecedentes que llevaron a proponer el mismo, la definición del problema de investigación, los objetivos planteados, la justificación y la hipótesis con la posible solución del problema.

### 1.1. Introducción

Las tecnologías de telecomunicaciones móviles de tercera generación y la creciente popularidad de los teléfonos inteligentes han impulsado en gran medida la demanda del usuario hacia los servicios de banda ancha móvil. Debido al explosivo crecimiento en el tráfico de datos y el reto de incrementar las capacidades de las redes, las compañías de telefonía móvil se han visto obligados a desarrollar planes para mejorar el rendimiento de sus redes. Es entonces cuando la tecnología LTE (Evolución a largo plazo, “*Long Term Evolution*”) se presenta como la mejor opción para estas compañías en la tan emblemática “Era de la banda ancha móvil”.

Actualmente la tecnología LTE es un estándar de comunicaciones inalámbricas que destaca por proporcionar altas tasas de datos y mejoras de QoS para satisfacer las necesidades de los usuarios de redes móviles. Aunque desde sus inicios esta tecnología fue lanzada como una solución únicamente para apoyar tasas de datos de alta velocidad, hoy en día es evidente el interés paulatino de la industria de las telecomunicaciones para soportar servicios de voz sobre LTE. Todo esto se debe ya que, a nivel mundial, los servicios de voz continúan siendo la principal fuente de ingresos para la industria de las telecomunicaciones.

Dentro de las principales ventajas que proporciona la tecnología LTE, se puede mencionar la estructura EPC (Núcleo de paquetes evolucionado o “*Evolved Packet Core*”) como una red “All-IP”, la misma que permite transportar todo tipo de tráfico de datos. Sin embargo, los tradicionales servicios de voz sobre redes de conmutación de circuitos no son soportados de forma nativa por la estructura EPC de LTE. Hoy en día, después de incursionar por algunos caminos de evolución el servicio de voz sobre LTE presenta cuatro soluciones comerciales: IMS (Subsistema Multimedia IP o “*IP Multimedia Subsystem*”)/SRVCC (“*Single Radio Voice Call Continuity*”), OTT

(“*Over-The-Top*”), CSFB (“*Circuit Switched FallBack*”) y SVLTE (“*Simultaneous Voice and LTE*”). Cada solución cuenta con sus propias ventajas. Sin embargo, el IMS es la solución final.

VoLTE en su forma más sencilla, especifica un servicio basado en IMS (IP Multimedia Subsystem) que trata de replicar las funcionalidades ofrecidas actualmente en el dominio de conmutación de circuitos 3G con una mayor calidad debido a la utilización de codecs de banda ancha y el reducido tiempo de establecimiento de llamadas inferior a un segundo, frente a los cerca de tres segundos de UMTS. La tendencia actual tanto para sistemas móviles 3G y LTE es proveer servicios de vídeo, voz y datos adaptables a las condiciones del tráfico, sin dejar de cumplir con la calidad de servicio (*QoS*, “*Quality of Service*”) que los usuarios demandan.

La calidad de servicio para sistemas móviles es un factor en el cual los operadores trabajan de manera integral, incluyendo evaluaciones y mejoras en diferentes entornos dentro de los cuales se pueden mencionar: canales de atención al cliente, sistemas de facturación y sobre todo los servicios tecnológicos provistos por la red como voz, datos y SMS (Servicio de Mensajes Cortos, “*Short Message Service*”), permitiendo satisfacer las expectativas de los clientes, que cada vez son más exigentes, para lograr una experiencia de comunicación satisfactoria. Por lo tanto, todas las empresas móviles están altamente interesadas en la mejora de calidad de los servicios que proveen, debido a que de ello depende su subsistencia en los mercados en los que participan.

Cualquier empresa de telecomunicaciones que necesite medir el rendimiento de su red debe disponer de Indicadores Claves de Desempeño (KPI; *Key Performance Indicator*), los mismos que deben ser capaces de medir cuantitativamente las metas fijadas por la compañía. Muchos de los indicadores empleados, entre los cuales se pueden mencionar cobertura, cantidad de llamadas caídas o bloqueadas, porcentaje de handovers fallidos, calidad de voz, entre otros, están relacionados a la calidad de servicio que se brinda a los clientes. Es decir; que la QoS que percibe el usuario, está directamente vinculada con el desempeño de la red móvil. Es verdad que VoLTE ha sido ofertado y desplegado como un servicio innovador que proporciona evidentes ventajas sobre las funcionalidades ofrecidas en el dominio de conmutación de circuitos

3G, sin embargo, actualmente la supervisión del rendimiento del servicio de voz sobre LTE es bastante ignorado. Provocando que los operadores se pregunten constantemente: ¿Qué KPI utilizar?, ¿cómo y cuáles son las pautas para el análisis de desempeño?

Por lo tanto, para el desarrollo de este trabajo de investigación se realizará un análisis del desempeño del servicio de voz sobre redes LTE mediante el uso de indicadores claves de rendimiento (KPI), el mismo que debe de ser entregado bajo los estándares de calidad de servicio para satisfacer las necesidades de los usuarios, asegurando un desempeño óptimo de la de la red de telefonía móvil.

## **1.2. Antecedentes**

En el ámbito investigativo existen diversos trabajos publicados en revistas y congresos relacionados al análisis del rendimiento y calidad de servicio en redes VoLTE. A continuación, se van a describir los artículos publicados que realizan un estudio acerca del tema.

1. En el trabajo realizado por (Abioye et al., 2015) se desarrolla una descripción general de todas las generaciones de redes desde la primera generación hasta la cuarta generación, así como las características diferenciadoras que respaldan la superioridad de la red 4G LTE con la red 3G. También utilizan herramientas de autoanálisis como gráficos de barras para comparar las características de las redes 4G LTE y 3G. Y la parte final del trabajo presenta las mejoras necesarias en 4G LTE.
2. El artículo publicado por (Kumaravel, 2011) describe los antecedentes y la visión de 4G. Se presenta una revisión sobre su desarrollo a través de la historia, características, y las perspectivas 3G-4G. También se realiza una descripción sobre las características generales del sistema 4G considerando la diversidad y adaptabilidad como claves básicas de impacto sobre los terminales móviles, la red y las aplicaciones, analizando desde un punto técnico, mostrando las técnicas y posibles problemas de investigación para un soporte suficiente de adaptabilidad. Al final, se detalla un resumen de las visiones 4G y algunos de los problemas que esta nueva tecnología puede enfrentar.
3. En el documento elaborado por (Majed et al., 2017) se evalúan las métricas especificadas en 3GPP para caracterizar las compensaciones entre el retraso y

la calidad de los teléfonos móviles VoLTE en diversas condiciones de red. Se informan los resultados de las pruebas sobre la precisión del reloj, el retraso del terminal en el enlace ascendente y el enlace descendente en condiciones sin errores, así como el retraso y la calidad en presencia de pérdidas de paquetes y fluctuación de fase de la red. Se discute cómo se puede ampliar la metodología subyacente para las pruebas de retardo y de esta manera evaluar el rendimiento del búfer antifluctuación usando un enfoque de caja negra, y cómo modelar las características de retardo/pérdida de paquetes VoLTE de una manera realista.

4. En el trabajo de investigación realizado por (Fortún, 2017) se realiza un análisis de los diferentes parámetros para lograr calidad de servicio en redes VoLTE y se propone una red con sus particularidades propias para funcionar en el país de Cuba con los equipos existentes de la red del operador ETECSA (Empresa de Telecomunicaciones de Cuba).
5. En el artículo publicado por (Vizzarri, 2016) se presenta un método para la estimación de QoE de un servicio VoLTE en situaciones realistas que se basan en información de QoS. Los escenarios multiusuario y multiservicio se modelan con la aplicación VoLTE entregada junto con la aplicación de búsqueda web HTTP. Las simulaciones se realizan usando el modelador OPNET 17.5. Se proporciona una comparación final de los resultados de la simulación para identificar los mejores modelos matemáticos para la estimación de QoE para la aplicación VoLTE.
6. En el artículo publicado por (Vaser & Forconi, 2015) se identifica los parámetros QoS y QoE, denominados respectivamente Key Performance Indicators (KPI) e Key Quality Indicators (KQI), para los servicios Video Streaming y Voice over LTE (VoLTE), y luego se analiza la relación matemática QoS / QoE. La principal contribución de esta investigación se basa en la posibilidad de predecir el nivel QoE esperado a través de la relación QoS/QoE para los servicios en estudio entregados a través de la red LTE.

### **1.3. Definición del problema**

Necesidad de analizar a través de indicadores claves de rendimiento (KPI) el desempeño del servicio de para garantizar una calidad de servicio (QoS) oportuna junto con una calidad de experiencia (QoE) aceptable percibida por los usuarios finales.

#### **1.4. Justificación**

La tecnología LTE promete satisfacer el requerimiento masivo de ancho de banda y rendimiento para el servicio de telefonía móvil. Éste es el primer estándar celular 3GPP completamente basado en IP, y ofrece a los usuarios finales una velocidad de descarga de datos de hasta 100 Mbps y una velocidad de carga de datos de hasta 50 Mbps.

Aunque desde sus inicios esta tecnología fue lanzada como una solución únicamente para apoyar tasas de datos de alta velocidad, hoy en día es evidente el interés paulatino de la industria de las telecomunicaciones para soportar servicios de voz sobre LTE. Todo esto se debe ya que, a nivel mundial, los servicios de voz aún representan un porcentaje significativo de los ingresos para la industria de telecomunicaciones. La calidad de voz entregada a través de las redes LTE promete ser, tan buena o mejor que en 3G.

VoLTE se considera como una de tecnologías más críticas y complejas de implementar para los operadores móviles. Este es el primer servicio importante para aprovechar el marco integral de QoS y control de políticas de LTE. Los diversos desafíos planteados por VoLTE obligan a los operadores móviles a realizar pruebas y desarrollar mecanismos eficientes para garantizar una QoS aceptable percibida por el usuario final.

Estos mecanismos se basan en un análisis desde el punto de vista de la red y otro desde el punto de vista del usuario. El primero analiza y supervisa continuamente el desempeño de la red a través de indicadores claves de rendimiento, también conocidos como KPI. El segundo intenta estimar la Calidad de Experiencia (QoE) percibida por el usuario final a nivel de aplicación. Es necesario la identificación de modelos matemáticos capaces de mapear las características de QoS en la capa de red con características de QoE en la capa de aplicación.

Es importante garantizar la QoS no solo para servicios basados en datos sino también para servicios sensibles como voz sobre LTE. Y aunque es verdad que VoLTE ha sido ofertado y desplegado como un servicio innovador que proporciona evidentes ventajas sobre las funcionalidades ofrecidas en el dominio de conmutación de circuitos

2G/3G, actualmente la supervisión del rendimiento del servicio de voz sobre LTE es bastante ignorada. Provocando que los operadores se pregunten constantemente: ¿Qué KPI utilizar, ¿cómo y cuáles son las pautas para el análisis de desempeño? Este trabajo de investigación realizará un análisis del desempeño del servicio de voz sobre redes LTE mediante el uso de indicadores claves de rendimiento (KPI) y presenta un método para la estimación de la QoE percibida por el usuario final.

## **1.5. Objetivos**

Los objetivos planteados para este proyecto son los siguientes:

### **1.5.1. Objetivo General**

- Realizar un análisis del desempeño del servicio de voz sobre la red LTE mediante el uso de indicadores de rendimiento y presentar un método para la estimación de la QoE percibida por el usuario.

### **1.5.2. Objetivos Específicos**

- Elaborar el estado del arte y los fundamentos teóricos de redes LTE
- Elaborar el estado del arte de IMS
- Describir los parámetros de rendimiento utilizados para diagnosticar el desempeño del servicio de VoLTE.
- Evaluar el rendimiento mediante el uso de indicadores de desempeño (KPI) para garantizar QoS y presentar un método para la estimación de la QoE del servicio VoLTE.

## **1.6. Hipótesis**

Mediante el uso de indicadores claves de desempeño (KPI), se podrá evaluar QoS de VoLTE, se establecerá resultados para presentar un método para la estimación de la QoE de VoLTE en situaciones realistas. La relación entre QoS/QoE se constituye por un enfoque ascendente. El análisis y la discusión de las funciones de mapeo QoS/QoE obtenidas se presentan junto con una comparación final de las mismas.

## **1.7. Metodología**

Este trabajo de investigación es explicativo ya que no solo describe el problema observado, también se acerca y busca explicar las causas que originaron la situación

analizada. Con este método de investigación se busca establecer las causas del problema con ayuda de distintos tipos de estudio, como análisis cuantitativo de estadísticas, pruebas de campo, entre otros, estableciendo conclusiones y explicaciones para enriquecer o esclarecer las teorías, confirmando o no la hipótesis.

Este tipo de investigación contribuye con la interpretación de una realidad o la explicación del por qué y para qué del objeto de estudio; con el objetivo de ampliar el “¿Qué?” de la investigación exploratoria y el “¿cómo?” de la investigación descriptiva.

Cuando se tienen los resultados de esta clase de investigación, se consiguen más claras las preguntas que orientarán posteriores trabajos, comprender mejor el objeto de estudio y garantizar la utilidad de las conclusiones de la investigación.

La investigación explicativa ayuda a distinguir las causas de muchos procesos, por lo tanto, permite anticipar a los posibles efectos que pueden generar algunos cambios en el mismo.

## CAPITULO II: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 2.1. Arquitectura genérica de los sistemas celulares

En los sistemas de comunicación móvil se pueden identificar tres entidades básicas, el equipo del usuario, la red de accesos y el núcleo. La figura 2.1 muestra el esquema de bloque de la arquitectura genérica de un sistema celular.

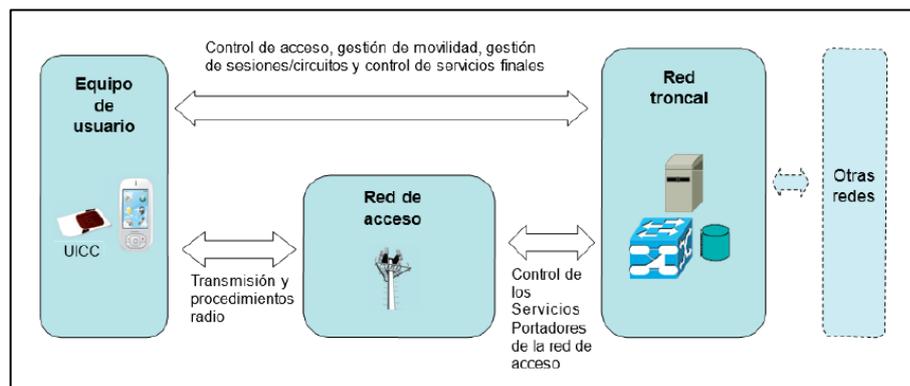


Figura 2. 1 Arquitectura genérica de un sistema celular  
Fuente: (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

- **Equipo de usuario (User Equipment, UE):** Dispositivo que contiene la información necesaria para permitir la conexión del usuario a la red y la utilización de los servicios. Este dispositivo se conecta a la red de acceso a través de una interfaz radio. Funcionalmente hablando, el Equipo de Usuario (UE) está compuesto por el Equipo Móvil (ME) y una tarjeta inteligente (Universal Integrated Circuit Card, UICC) tal como se detalla en la figura 2.2. (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

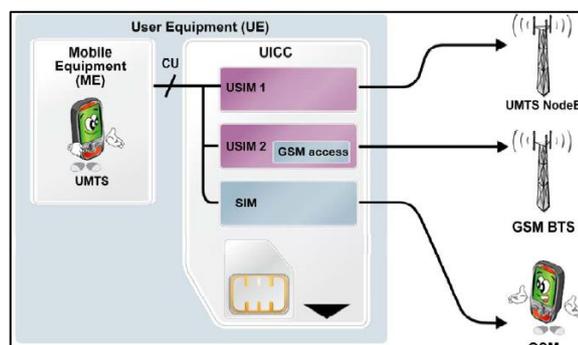


Figura 2. 2 Estructura general de la tarjeta inteligente UICC  
Fuente: (Alcatel-Lucent, 2013)

- **Módulo de identidad del suscriptor de UMTS (USIM):**

El USIM (*UMTS Subscriber Identity Module*) se utiliza para almacenar identidad de suscriptor, claves de cifrado, así como datos de algoritmos de

autenticación. También mejora la seguridad con un proceso de autenticación que se realiza entre la tarjeta y la red y viceversa. La información más importante que contiene es la siguiente: idioma, directorio de aplicaciones, directorio, IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*, Identidad Internacional del Abonado Móvil) MSISDN (*Mobile Station Integrated Services Digital Network*), TMSI (*Temporary Mobile Subscriber Identity*), PTMSI (*Packet-Temporary Mobile Subscriber Identity*), claves de seguridad, parámetros de SMS, acceso al servicio, ID temporal LAI (*Local Area Identity*) / RAI (*Routing Area Identity*), etc. La interfaz entre ME y USIM es la interfaz Cu. (Alcatel-Lucent, 2013)

- **Tarjeta de circuito integrado UMTS (UICC)**

Es una tarjeta que puede contener uno o varios USIM para diferentes aplicaciones y también el módulo SIM para ser utilizado en un terminal GSM. Otra posibilidad es incluir mecanismos adicionales en la parte USIM para proporcionar el acceso GSM y ser utilizables en un terminal UMTS / GSM multimodo. (Alcatel-Lucent, 2013)

- **Red de acceso (Radio Access Network, RAN):** Sistema responsable de la gestión de los recursos de radio permitiendo la conexión entre el usuario y el núcleo de la red donde se realizan las funciones de transporte e inteligencia que permite la conexión del tráfico de los usuarios hacia y desde otro tipo de redes de telecomunicaciones. (Ricaurte Zambrano & Delgado Arechúa, 2010) Los servicios de transmisión ofrecidos por la red de acceso permiten transportar desde el equipo del usuario los datos y la señalización hacia la red troncal. La activación de los recursos de transmisión en la red de acceso se controla generalmente desde la red troncal. La red de acceso está formada por estaciones base y controladores. (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)
- **Red troncal (Core Network, CN):** Es la parte del sistema encargada del control de acceso a la red celular mediante la autenticación de los usuarios, gestión de la movilidad, gestión de las sesiones de datos o circuitos que transportan la información de los usuarios, mecanismos de interconexión con otras redes, etc. La red troncal está formada por equipos que albergan funciones

de conmutación de circuitos, enrutamiento de paquetes, bases de datos, etc.(Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

La arquitectura genérica ha sido utilizada por las diferentes generaciones de sistemas celulares 2G y 3G, y aún se mantiene para el sistema LTE.

## 2.2. Arquitectura general de los sistemas 3GPP

La arquitectura de los sistemas 3GPP se adapta a la arquitectura general de los sistemas celulares descrita en el punto 2.1. Tal como se detalla en la figura 2.3, los sistemas 3GPP se conforman por el equipo de usuario (UE) y de una infraestructura de red que se encuentra dividida de forma lógica, en una de red troncal (Core Network) y una de red de acceso (Access Network). (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

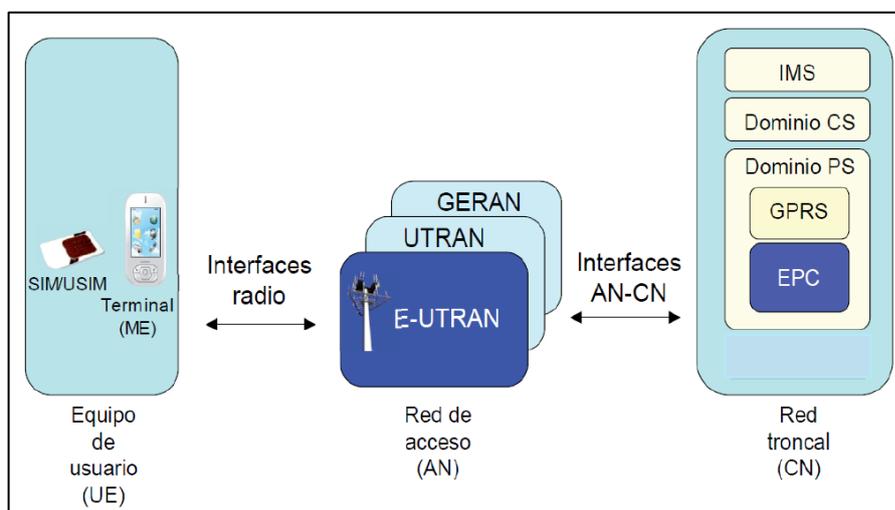


Figura 2. 3 Arquitectura general de los sistemas 3GPP

Fuente: (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

El equipo de usuario está compuesto por 2 elementos: el terminal del usuario o dispositivo móvil y la tarjeta denominada SIM (Subscriber Identity Module), para GSM y para UMTS Y LTE se conoce como USIM (Universal SIM), su función es almacenar la información y sustentar los procedimientos que se refieren a la suscripción del usuario y a los servicios proporcionados por la red. (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

Existen tres tipos de red de acceso dependiendo de la tecnología que se utilice: GERAN (GSM/EDGE Radio Access Network) y UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) estos dos son utilizados por el sistema 3G UMTS. En el caso de LTE

se usa E-UTRAN (Evolved-UTRAN). Estas redes de acceso emplean diferentes tecnologías en las interfaces de radio para establecer la comunicación con el equipo de usuario, GERAN utiliza un acceso basado en TDMA a la vez que UTRAN utiliza WCDMA y en el caso de LTE la tecnología elegida es OFDMA para downlink (DL) y CS-FDMA en uplink (UL).(Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

El core o núcleo de la red se divide lógicamente de la siguiente manera:

- **Dominio de circuitos (Circuit Switched, CS):** Se encuentra conformado por las entidades que se basan en la conmutación de circuitos, es decir, a los servicios que se les asignan recursos de una forma dedicada. CS solo es accesible mediante GERAN y UTRAN.(Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)
- **Dominio de paquetes (Packet Switched, PS):** Se compone por las entidades de red basadas en la conmutación de paquetes. El dominio de paquetes se implementó de dos maneras: GPRS (General Packet Radio Service) el cual se desarrolló para las redes GSM sin embargo actualmente forma parte del sistema UMTS y el EPC (Evolved Packet Core) que es la evolución de GPRS pensado para el uso en LTE la cual proporciona un servicio de conectividad IP a los equipos de los usuarios a través de E-UTRAN; también soporta acceso a los servicios IP desde otras RAN.(Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)
- El subsistema IMS proporciona mecanismos de control que son necesarios para la provisión de servicios multimedia basados en el uso del protocolo IP a los usuarios de la red LTE. IMS se materializa mediante el despliegue de infraestructura constituida por una serie de elementos (bases de datos, servidores, etc.) que se comunican entre sí y que permiten gestionar la provisión de servicios como lo es la VoLTE. (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

### 2.3. Introducción al estándar LTE

La tecnología LTE (“*Long Term Evolution*”, Evolución a Largo Plazo) para sistemas inalámbricos 4G desarrollada para satisfacer el ancho de banda y rendimiento de la solicitud masiva.(Vizzarri, 2016) LTE es el primer estándar celular 3GPP

completo basado en IP y se introdujo a partir del Release 8 de la 3GPP, como una evolución a las redes HSPA (rel.6) e I-HSPA (rel.7). (Jaramillo, 2015)

LTE es una tecnología de radio acceso con canales o portadoras de ancho de banda en un rango de 1.4MHz hasta 20MHz. Las bandas de frecuencia estándares en que se implementa esta tecnología, incluyen las bandas 700MHz, 850MHz, 1700MHz, 1800MHz, 1900MHz, 2100MHz, 2600MHz. La interfaz de aire comprende tecnologías FDD (*Frequency División Duplexing*) y TDD (*Time Division Duplexing*). (Jaramillo, 2015)

Dependiendo de la tecnología y el ancho de banda de la portadora LTE, el sistema permite tasas de Throughput de 150Mbps en downlink y de 50Mbps en uplink. Emplea como método de acceso OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), el mismo que es una tecnología de acceso basada en división de frecuencia en conjunto con sub portadoras ortogonales. (Jaramillo, 2015)

El desarrollo de funciones avanzadas de LTE como MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) y agregación de portadoras, permite el aumento de capacidad y tasas de transmisión. (Jaramillo, 2015)

### **2.3.1. Objetivos de LTE (Morales, 2015)**

Dentro de los principales objetivos de la tecnología LTE destacan:

- Admitir la semejanza tecnológica móvil con sistemas antecesores.
- Optimizar la calidad de servicio (QoS) en la arquitectura de la red LTE.
- Certificar la coexistencia táctica entre las redes LTE y 2G/3G.
- Admitir velocidades reales en la transferencia de datos, como mínimo 100 Mbps en el canal downstream y 50 Mbps en upstream. (tasa de datos teóricas downstream de 326 Mbps y en upstream de 86.4 Mbps).
- Proporcionar flexibilidad y escalabilidad entre bandas de frecuencia.
- Preservar estabilidad en la calidad de la señal en escenarios de multitrayectoria.
- Extender la zona de cobertura de las células y la capacidad del sistema.

### 2.3.2. Características técnicas del sistema LTE.

LTE busca reducir el retardo generado en el procesamiento de señales digitales en la interfaz aire; mientras que en el sistema HSPA+ el retardo es de 50 ms, en LTE, el valor está por debajo de los 10 ms (Morales, 2015). La Tabla 2.1, detalla un resumen de las especificaciones técnicas de LTE:

Tabla 2. 1 Métricas y sus características técnicas en LTE

Métricas	Especificaciones
Velocidad Máxima (para un espectro de 20 MHz)	DL: 173 Mbps 2x2, 326 Mbps 4x4 UL: 86 Mbps 1x2
Acceso de Radio	Downlink: OFDMA Uplink: SC-FDMA
MIMO	Downlink: 2x2,4x2,4x4 Uplink: 1x2,1x4
Soporte de Movilidad	Hasta 350 Km/h
Latencia del Plano de Control (Tiempo de transición al estado activo)	Menor a 10 ms para pasar de idle a active
Latencia del Plano de Usuario	Menor a 5 ms
Capacidad del Plano de Control	Más de 200 usuarios por celda (para un espectro de 5 MHz)
Cobertura (Tamaño de las celdas)	Rendimiento óptimo hasta 5 Km, efectivo hasta 30 km y limitado hasta 100 Km
Flexibilidad Espectral	1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz
Modos Transmisión	TDD, FDD, Half-duplex FDD
Modulación Adaptativa	QPSK, 16QAM y 64AM

Fuente: (Morales, 2015)

## 2.4. Estructura de red LTE

### 2.4.1. Arquitectura del sistema LTE

La arquitectura del sistema LTE, se denomina formalmente EPS (*Evolved Packet System*). El sistema está compuesto por el E-UTRAN y el EPC, formando el Evolved Packet System (EPS). La figura 2.4 detalla la arquitectura de la red LTE y los elementos que la componen. Tanto la E-UTRAN como el EPC, están compuestos de

diversos elementos de red, y su comunicación se realiza a través de interfaces abiertas hacia las distintas capas de la red, e inclusive hacia otras redes tipo No-LTE (GSM/3G).(Jaramillo, 2015)

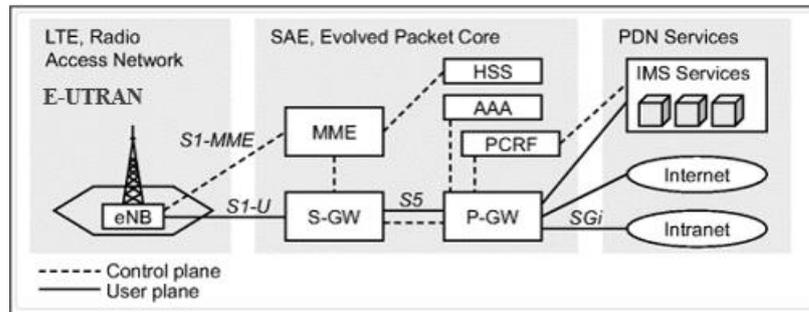


Figura 2. 4 Arquitectura del Sistema LTE  
Fuente: (Penttinen, 2011)

El Evolved-UTRAN se compone únicamente de la radio base, definida en LTE como eNodeB (evolved-NodeB). A diferencia de la arquitectura de redes 2G & 3G, la capa de radio acceso E-UTRAN no contiene un elemento tipo Controlador de Red de Radio (RNC o BSC), solo se conforma exclusivamente de una red de radio bases eNodeBs. (Jaramillo, 2015)

El Evolved Packet Core (EPC) se compone principalmente de tres entidades. El MME (*Mobility Management Entity*), el S-GW (*Serving Gateway*) y el P-GW (*Packet data network Gateway*). El plano de control es administrado únicamente por el MME, mientras que el plano de usuario o información es procesado por el S-GW y el P-GW. (Jaramillo, 2015)

#### 2.4.2. E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access)

La red E-UTRAN está compuesta de eNBs, que proporcionan el plano de usuario E-UTRA (PDCP / RLC / MAC / PHY) y las terminaciones del protocolo de plano de control (RRC) hacia el UE. Los eNB están interconectados entre sí por medio de la interfaz X2, también se conectan por medio de la interfaz S1 al EPC (Evolved Packet Core), más específicamente a la MME (Mobility Management Entity) mediante la interfaz S1-MME y al Serving Gateway (S-GW) por medios de la interfaz S1-U. La interfaz S1 admite una relación muchos a muchos entre MME / S-GW y eNB.(3GPP, 2016). La figura 2.5 muestra la arquitectura E-UTRAN.

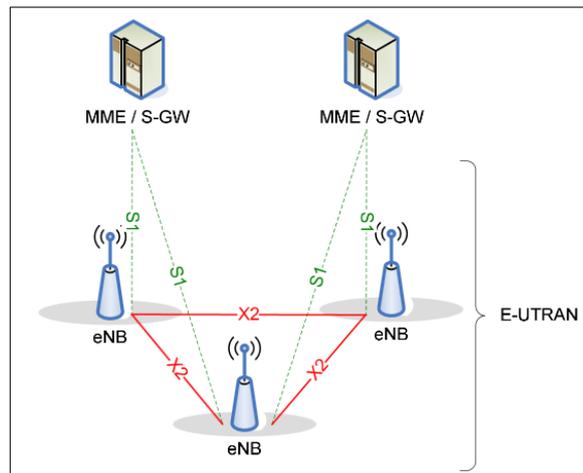


Figura 2. 5 Arquitectura E-UTRAN

Fuente: (3GPP, 2016)

- **Interfaces de E-UTRAN** (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)
  - **Interfaz Uu:** Conocida también como LTE Uu o simplemente interfaz radio LTE. Esta interfaz utiliza el canal radio para transmitir información entre el eNB y los equipos de usuario.
  - **Interfaz S1:** Encargada de la conexión entre la red troncal EPC con el eNB. Esta interfaz se encuentra compuesta en realidad por otras dos interfaces diferentes: **S1-MME** la cual sustenta el plano de control y **S1-U** la cual en complemento con la anterior da soporte al plano de usuario. La separación entre plano de control y plano de usuario es una característica importante asociada a las interfaces de la red LTE. Gracias a esto el eNB es capaz de conectarse a dos nodos distintos de la red troncal, de esta manera mediante S1-MME hay una comunicación con la EPC, pero solo con el plano de control (con la entidad de red MME, Mobility Management Entity). Así pues, mediante S1-U hay comunicación con una entidad de red distinta, que procesa el plano de usuario (con el S-GW, Serving Gateway).
  - **Interfaz X2:** Interfaz utilizada entre eNBs para establecer una conexión entre sí. Mediante esta interfaz, se realiza el intercambio de diferentes mensajes entre los eNB tanto de señalización, encargados de una mejor gestión de la utilización de los recursos radio (reduciendo interferencias) así como mensajes de tráfico de los usuarios del sistema cuando se encuentran desplazándose de un eNB a otro durante un proceso de handover.

### 2.4.3. E-NodeB (Evolved Node B)

El E-nodeB es la entidad encargada de todas las funciones de la red de acceso, maneja la transmisión de paquetes IP desde y hacia el equipo del usuario junto con los mensajes de señalización requeridos para el control de la operación de la interfaz radio. La transmisión de paquetes IP entre el UE y el eNB se refiere al servicio Radio Bearer (RB) o portadora de radio tal como lo muestra la figura 2.6. Cada eNB establece una relación con cada uno de los equipos de usuario que se encuentran conectados a él, la misma que se almacena como información imprescindible para conservar activos los servicios de E-UTRAN, dentro de esta información destaca el estado del equipo de usuario, servicios portadores activos, información de seguridad, capacidades del terminal, etc. (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

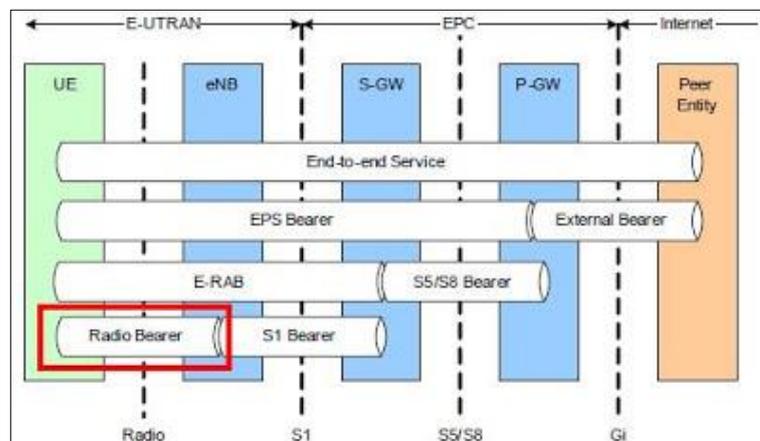


Figura 2. 6 Bearers LTE: Radio Bearer  
Fuente: (Teletopix, 2016)

La función principal del E-nodeB es la administración de los recursos de radio. Es decir, tanto la función de control de admisión de los servicios portadores radio como el control de movilidad depende del E-nodeB. Debido a que los E-nodeB se encuentran interconectados a través de la interfaz X2 cuentan con la capacidad de realizar el control de interferencias entre estaciones base, en cuanto a los enlaces descendente y ascendente es capaz de realizar la funciones de scheduling, es decir asignar dinámicamente los recursos radio. (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

Otra de las características que destaca sobre la funcionalidad del E-nodeB es que selecciona dinámicamente la entidad MME cuando un UE se registra en la red, brindándole mayor flexibilidad. Un En-NodeB se puede conectar a varios MME al mismo tiempo. Al conjunto de MME a los que tiene acceso un eNB es denominado su

pool área. Gracias a esto, es posible balancear las diferentes cargas de señalización entre distintos MME por medio de la selección de un MME específico que se encargará de la administración del acceso de cada usuario; incrementando de esta manera la robustez del sistema en caso de falla. Esta función es posible gracias a la interfaz denominada S1 flexible.(Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

#### 2.4.4. EPC (Evolved Packet Core)

El EPC es la red central, y está basada en IP (Protocolo de Internet) para transportar todos los servicios en una arquitectura con conmutación de paquetes. Esta implementación proporciona una arquitectura plana, donde hay pocos nodos de red, sin continuas conversiones de protocolos.(Vaser & Forconi, 2015)

- **Arquitectura e Interfaces**

Tal como se muestra en la figura 2.7 el sistema EPC está formado por tres entidades de red importantes el MME la S-GW, P-GW y una base de datos principal HSS, estos elementos son elementales para proporcionar servicios de conectividad IP entre los equipos de usuario que se encuentren conectados mediante E-UTRAN y otras redes conectadas a la EPC. Existe un plano de usuario y uno de control para el caso del EPC las funciones del plano de usuario están controladas mediante S-GW y P-GW mientras que MME se encarga de las funciones y señalización del plano de control. (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

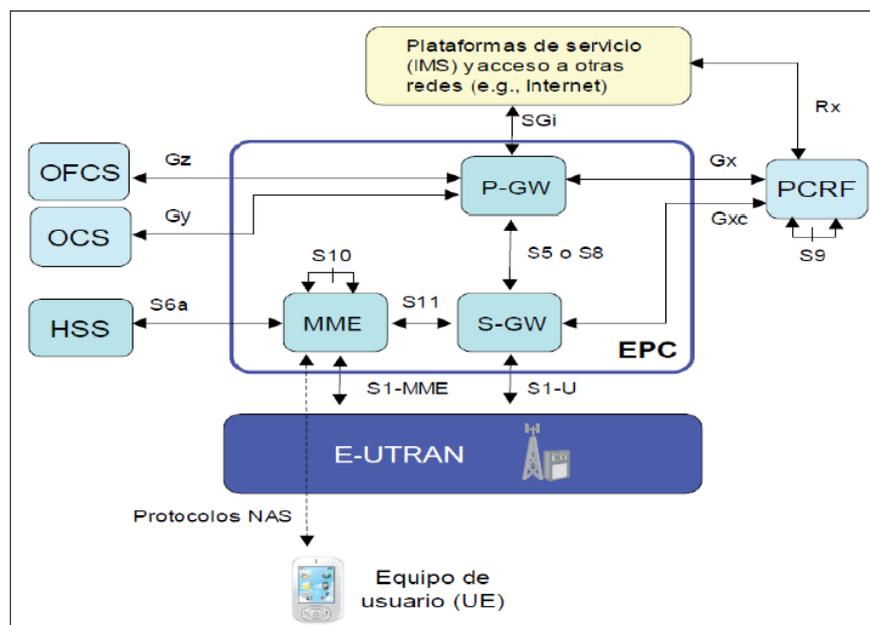


Figura 2. 7 Arquitectura básica del EPC y sus interfaces  
Fuente: (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

La entidad MME maneja las funciones de transferencia del plano de usuario de la red mediante la interfaz S11 con S-GW, además hace uso de la interfaz S10 para comunicarse con otros MME. Por otro lado, se conecta a la base de datos del HSS por medio de la interfaz S6 esto con el fin de acceder a la información de los usuarios que están autorizados a establecer una conexión a través de E-UTRAN. Es importante mencionar que todo terminal que se encuentra registrado en la red LTE y es accesible a través de E-UTRAN cuenta con un MME asignado. (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015) Entre las funciones principales que ofrece el MME destacan: (Morales, 2015)

- Administración de la Movilidad.
- Control de las sesiones.
- Control de acceso y autenticación del terminal de usuario.
- Administración de listas de Tracking Áreas (celdas de cobertura).
- Señalización y encriptación de EPC.
- Selección del P-GW y S-GW
- Selección de la SGSN para el handover con redes acceso 2G/3G.
- Administración de los recursos de radio (Bearer).
- Reglas para interceptación del tráfico de señalización.
- Seguridad en la señalización.

El P-GW (Packet Data Network Gateway) se encarga de realizar la interconexión de la EPC con redes externas o la plataforma IMS a través de la interfaz SGi. Entre las principales funciones destacan la asignación de direcciones IP a los equipos de usuario y los mecanismos de control de los parámetros de calidad de servicio. Se conecta al S-GW por medio de una interfaz lógica, si el P-GW y el S-GW se encuentran en la misma red se comunican a través de la interfaz S5, pero si se encuentran a redes de distintos operadores la comunicación se realiza a través de la interfaz S8. (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015) Entre las funciones que ofrece el P-GW destacan: (Morales, 2015)

- Realiza la inspección, verificación y filtrado de paquetes válidos.
- Control de la tarificación y del uso de la red.
- Asignación de la dirección IP para le terminal de usuario.
- Soporte para la interconexión entre múltiples redes.

- Soporta la marcación de paquetes en el enlace de subida y bajada en función de la priorización del envío.
- Aplicación de las reglas de uso de la red y control de tarificación en función de los servicios contratados.
- Generación de CDR, por volumen y tiempo.
- Generación de CDR para conciliación de tráfico con otras operadoras.

El S-GW (Serving Gateway) se caracteriza por funcionar como Gateway del plano de usuario entre E-UTRAN y la EPC. Un usuario de la red LTE tiene a su disposición un S-GW determinado por medio del cual transcurre su plano de usuario (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015). El S-GW lleva en control de la movilidad entre los e-NodesB (Handover) y además realiza el enrutamiento y envío de los paquetes de datos. Entre las funciones que ofrece el S-GW destacan: (Morales, 2015)

- Sirve como punto de anclaje de movilidad local para el handover entre los e-NodesB.
- Ayuda al e-NodeB, en el enrutamiento de paquetes durante los procesos de handover entre nodos.
- Punto de anclaje local para la movilidad entre redes.
- Retención temporal de paquetes IP cuando el usuario no se encuentra conectado.

El HSS (Home Subscriber Server) almacena la información relacionada con la suscripción de usuario y la necesaria para la operación de la red, por ejemplo: información del perfil de usuario, claves de seguridad, ubicación del usuario dentro de la red, además de la identificación universal del usuario y del número de servicio (IMSI y en MSISDN). Básicamente el HSS, agrupa funcionalidades del HLR y el AuC (*Authentication Center*). Entre las funciones que ofrece el HSS destacan:(Morales, 2015)

- Autenticación y registro de usuario.
- Transferencia del perfil de usuario hacia la MME.
- Restricciones de Roaming.
- Restricciones de servicios (barring level).

Es importante mencionar que las entidades MME S-GW y P-GW constituyen a entidades exclusivas de la red troncal EPC mientras que las restantes como lo son HSS, PCFR, OCS, OFCS, entre otras, son entidades comunes en las redes 3GPP. Por esta razón, para tener una mejor perspectiva de la estructura del EPC se describe a continuación las funcionalidades básicas de las plataformas antes mencionadas.

El PCRF (*Policy and Charging Rules Function*) forma parte de las funciones denominadas PCC (*Policy and Charging Control*), es utilizado para controlar la activación y el establecimiento de los parámetros de QoS así como los modos de tarificación. Esta entidad controla los bearers del plano de usuario de la red LTE mediante la interfaz Gx conectada directamente con P-GW y la interfaz Gxc conectada a S-GW, también se puede comunicar con otras entidades PCRF mediante la interfaz S9. La interfaz Rx se encarga de establecer los bearers EPS a otras redes que tengan acceso a la red LTE por ejemplo una videoconferencia a través de IMS. (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015) Es decir, que el PCRF es la plataforma encargada de crear las reglas de tarificación que van a aplicarse al tráfico de usuario, en función del servicio contratado; es importante recalcar que se enfoca únicamente al tráfico postpago. Entre las funciones que ofrece el PCRF destacan:(Morales, 2015)

- Administración de políticas de servicios.
- Administración de recursos.
- Control dinámico de la QoS.
- Aplicación de políticas por tipo de usuario y servicio.
- Aplicación de políticas por volumen y tiempo de servicio.

Por ultimo las entidades OFCS (Offline Charging System) y OCS (online Charging System) establecen la tarificación de la red basada en distintos parámetros como lo son el tiempo de uso, volumen de datos, etc. Se conectan a P-GW mediante Gz (OFCS) y Gx (OCS). (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

A continuación, la tabla 2.2 detalla una breve descripción de las entidades que conforman el EPC junto con las interfaces involucradas:

Tabla 2. 2 Función de las entidades que conforman el EPC y sus interfaces.

	Denominación	Descripción
<b>Entidades de red EPC</b>	MME	Nodo que canaliza el plano de control de la red LTE
	S-GW	Punto de anclaje del plano de usuario en la red troncal
	P-GW	Pasarela para la interconexión de redes externas
<b>Entidades comunes a las redes 3GPP</b>	HSS	Base de datos global del sistema (contiene, entre otros, los datos de suscripción de los usuarios)
	PCRF	Elemento central del sistema de control de uso de la red
	OCS	Nodo de control para la provisión de servicios que requieren tarificación online
	OFCS	Nodo de recolección de la información de tarificación para su posterior transferencia al sistema de facturación
<b>Interfaces</b>	Denominación	Entidades asociadas
	S1-MME	MME - E-UTRAN (eNB)
	S1-U	S-GW - E-UTRAN (eNB)
	S-Gi	P-GW - redes externas
	S6a	MME HSS
	S5/S8	P-GW - S-GW T
	S11	MME - S-GW
	S10	MME - MME
	Señalización NAS	UE - MME
	Rx	PCRF - Plataformas servicios
	S9	PCRF - PCRF
	Gx/Gxc	P-GW/S-GW - PCRF
	Gz/Gy	P-GW - OFCS/OCS

Fuente: (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

#### 2.4.5. Arquitectura de protocolos para LTE

La arquitectura de protocolo de radio para LTE puede separarse en arquitectura de plano de control y plano de usuario. La figura 2.8 muestra el stack de protocolos LTE (Chen & Lagrange, 2014). El stack de protocolos se divide en cuatro subcapas: Capa física (PHY, “Physical”), capa de control de acceso al medio (MAC, “*Medium Access Control*”), capa de control de enlace de radio (RLC, “*Radio Link Control*”) y capa de protocolo de convergencia de paquetes de datos (PDCP, “*Packet Data Convergence Protocol*”). Como se observa en la figura 2.8, las capas mencionadas anteriormente son comunes para el usuario y el plano de control. (Chen & Lagrange, 2014) Las diferentes capas de protocolo se resumen a continuación:

- **Capa física (PHY, “Physical”):** Es responsable de la codificación y decodificación, modulación y demodulación, del procesamiento y mapeo de la señal de múltiples antenas para proveer los recursos físicos de frecuencia de tiempo apropiados. También maneja el mapeo de canales de transporte a canales físicos. (Chen & Lagrange, 2014)
- **Capa de control de acceso al medio (MAC, “Medium Access Control”):** Es responsable de la multiplexación de datos de diferentes portadoras de radio, retransmisión HARQ (“Hybrid Automatic Repeat Request”) y programación para enlace ascendente y enlace descendente. Solo hay una entidad MAC por UE.(Chen & Lagrange, 2014)
- **Capa de control de enlace de radio (RLC, “Radio Link Control”):** La capa RLC se encuentra entre las capas PDCP y MAC. Se comunica con la capa PDCP por medio de SAP (“Service Access Points” o Puntos de Acceso al servicio) y con la capa MAC por medio de canales lógicos. Se encarga de la segmentación, concatenación, retransmisión y entrega secuencial a capas superiores. La capa RLC reordena los PDU (“Packet Data Unit”) RLC en el caso de que se reciban fuera de secuencia debido a la operación HARQ (“Hybrid ARQ”) realizada en la capa MAC. Existe una entidad RLC por portadora de radio (“radio bearer”) configurada para un terminal. Esta capa reajusta los paquetes PDCP para que su tamaño sea el indicado por la capa MAC, es decir, segmenta y/o agrupa paquetes PDCP y, en recepción, vuelve a juntarlos como estaban originalmente. Las funciones de la capa RLC se realizan a través de entidades RLC. Las entidades RLC se pueden configurar en tres modos de transmisión: TM (“Transparent Mode”, o Modo Transparente), UM (“Unacknowledged Mode”, o Modo no Reconocido) y AM (“Acknowledged Mode” o Modo Reconocido). (Chen & Lagrange, 2014)

En el modo TM, la entidad RLC no realiza ninguna función y es transparente para el resto de las capas. No realiza reajuste de paquetes PDCP ni se encarga de reordenar paquetes, aunque tampoco introduce carga adicional en cabeceras. El uso de este modo es muy limitado y se usa solo para mensajes

de información del sistema, mensajes de paginación y en casos especiales con mensajes RRC. El uso de este modo no está permitido para el plano de usuario. Para este modo la entidad RLC se configura como transmisora o receptora, es decir, proporciona una transferencia de datos unidireccional. (Cardona et al., 2011)

En el modo UM, al igual que en el modo TM la entidad RLC proporciona un servicio de transferencia de datos unidireccional. El modo UM se emplea principalmente por datos sensibles al retraso y tolerantes a pérdidas de paquetes. Las principales funciones de este modo de configuración son las siguientes: (Cardona et al., 2011)

- Segmentación y agrupación de paquetes PDCP
- Reordenación de paquetes RLC
- Detección de paquetes RLC duplicados
- Reajuste de paquetes para volver a formar los paquetes PDCP originales.

El modo AM RLC se utiliza principalmente mediante aplicaciones sensibles a errores, pérdida de paquetes, pero tolerantes al retardo, como por ejemplo la navegación web, la característica más importante es la “retransmisión”. Este modo proporciona un servicio de transferencia de datos bidireccional ya que, al recibir el reconocimiento negativo, la misma entidad RLC deberá retransmitir el paquete requerido. El objetivo de las retransmisiones es ofrecer una transmisión sin errores por medio de operaciones de ARQ. Las entidades RLC configuradas bajo el modo AM realizan las funciones descritas anteriormente para el modo UM y además: (Cardona et al., 2011)

- Retransmisión de paquetes RLC.
- Resegmentación de paquetes RLC retransmitidos.
- Realizar sondeos, referidos como “polling” en el estándar.
- Generar informes sobre el estado de recepción de paquetes.
- Prohibir la generación de informes durante cierto tiempo.

Las entidades RLC en modo AM pueden enviar tanto paquetes de datos como de control, siendo la única diferencia un bit de control en la cabecera RLC.

Es importante mencionar que los modos UM y AM se eligen por medio del eNodeB durante el procedimiento de establecimiento de bearers RRC (“*RRC radio bearer setup*”), la elección depende de los requisitos de QoS del EPS bearer.(Cardona et al., 2011)

- **Capa de protocolo de convergencia de paquetes de datos (PDCP, “*Packet Data Convergence Protocol*”):** Comprime el encabezado IP de los paquetes de usuario para reducir el número de bits que se transmiten a través de la interfaz de radio. Otra función principal de PDCP es el cifrado. Existe una entidad PDCP por portadora de radio configurada para un terminal. (Chen & Lagrange, 2014)

#### **Plano de usuario:**

En el plano de usuario, los paquetes en la red de núcleo se encapsulan mediante un protocolo específico del EPC y se tunelizan entre el P-GW y el eNodeB. Se usan diferentes protocolos de tunelización en diferentes interfaces. El protocolo GTP-U (“*GPRS Tunnelling Protocol*”) se utiliza sobre las interfaces de la red de core. Este protocolo canaliza los datos de usuario entre eNodeB y S-GW, así como entre S-GW y P-GW. GTP-U encapsula todos los paquetes de IP del usuario. La diferencia entre el plano de control y el plano de usuario se encuentra principalmente en la capa RLC (Control de enlace de radio), que se puede distinguir por diferentes entidades RLC. (Chen & Lagrange, 2014)

#### **Plano de control:**

Los protocolos del plano de control son responsables de la conexión y establecimiento de los bearers, la movilidad y la seguridad. El plano de control del “*Access Stratum*” maneja funcionalidades específicas de radio. El plano de control del “*Non-Access Stratum*” es administrado por el MME, incluye gestión de EPS bearers, autenticación, seguridad y procedimientos en modo Idle como el paging.(Chen & Lagrange, 2014)

- **Protocolo RRC:** Es un protocolo de “*Access stratum*” de capa 3 localizado en el eNodeB. Es responsable del establecimiento de los bearers de radio,

transmisión de información del sistema de radiodifusión, transmisión de los mensajes de paging desde el MME, y configuración de todas las capas inferiores usando la señalización RRC entre el eNodeB y el UE.(Chen & Lagrange, 2014)

- **Protocolo S1-AP (Protocolo de Aplicación S1):** Se utiliza en el plano de control entre el eNodeB y el MME en la red de núcleo en la interfaz S1. Proporciona servicio de señalización como el establecimiento de bearer S1 (*“S1 bearer setup”*), handover, paging, etc.(Chen & Lagrange, 2014)
- **Protocolo GTP-C (*“GPRS Tunneling Protocol Control Plane”*):** Es la parte de control o señalización de GTP. Se utiliza en el plano de control entre los equipos de core LTE, MME, S-GW, PDN-GW para la señalización específica para el establecimiento de bearers LTE y reenvío del contexto del UE durante el cambio de MME al que se encuentra registrado.(Chen & Lagrange, 2014)
- **Protocolo Diameter:** Conocido también como el protocolo de Autenticación, Autorización y Contabilidad (AAA) de próxima generación. Se utiliza ampliamente en la arquitectura IMS para el intercambio de información relacionada con AAA entre los equipos de dicha arquitectura. El concepto básico detrás de DIAMETER es proporcionar un protocolo base que pueda ampliarse para proporcionar servicios AAA a las nuevas tecnologías de acceso (Chen & Lagrange, 2014).

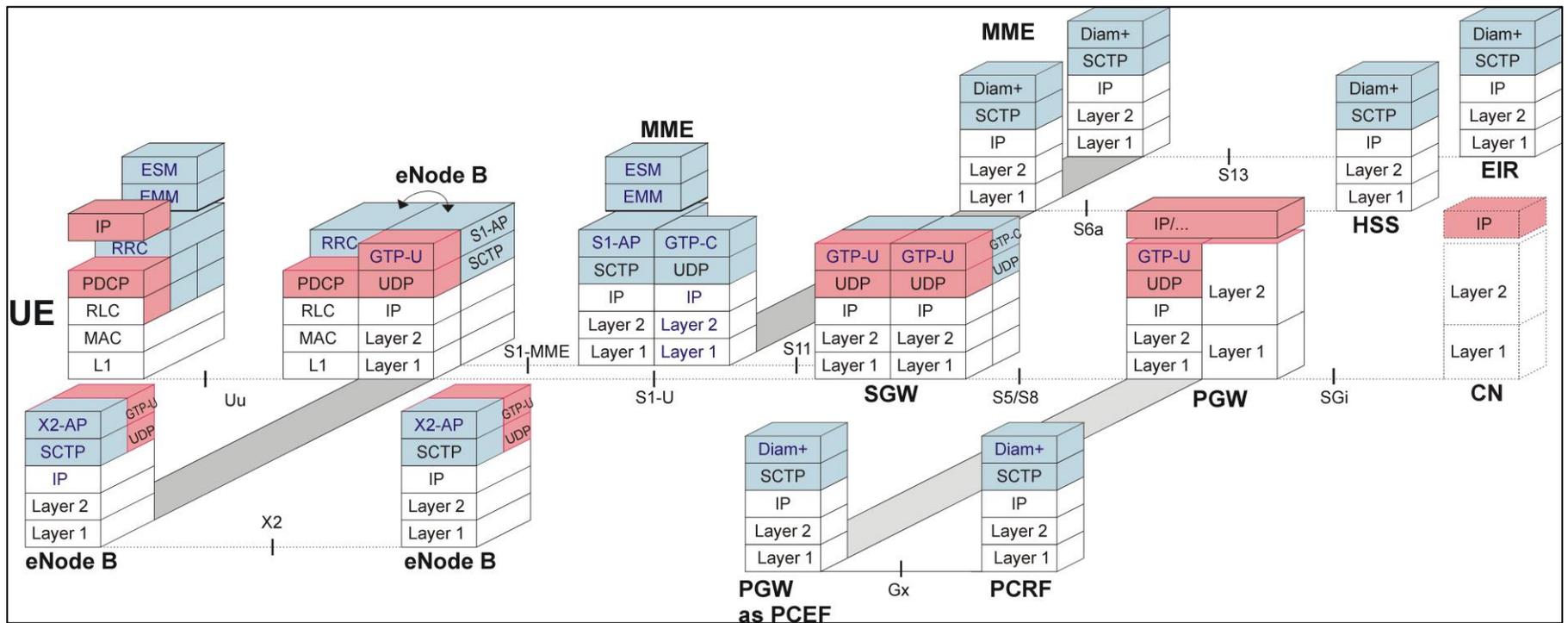


Figura 2. 8 Stack de Protocolos LTE-EPC  
Fuente: (Chen & Lagrange, 2014)

## 2.5. Tecnologías propias de LTE

Como se observa en la figura 2.9 LTE utiliza nuevos esquemas de acceso múltiple en la interfaz aire: OFDMA (“*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*” o Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal) en enlace descendente y SC-FDMA (“*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*” o Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portador Único) en enlace ascendente. Además, los esquemas de antena MIMO forman una parte esencial de LTE. Esta tecnología de cuarta generación también incluye dos modos de funcionamiento: FDD (Frequency Division Duplex) y TDD (Time Division Duplex).

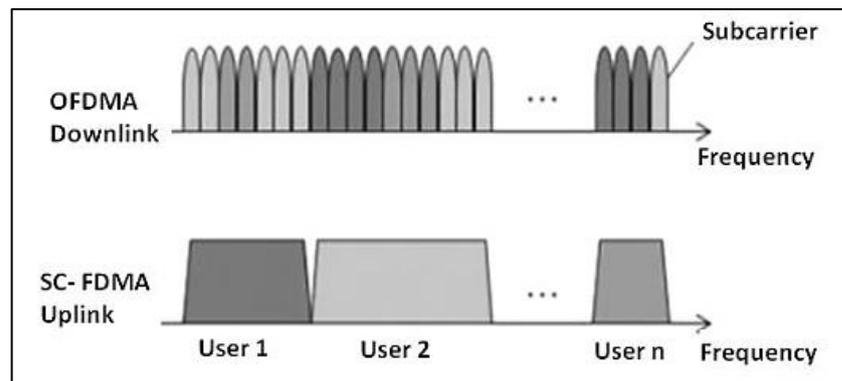


Figura 2. 9 SC-FDMA y OFDMA en LTE

Fuente: (Sukar & Pal, 2014)

### 2.5.1. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex)

El esquema de transmisión de enlace descendente para los modos E-UTRA FDD y TDD se basa en OFDM convencional. En un sistema OFDM, el espectro disponible se divide en múltiples portadoras, llamadas subportadoras. Cada una de estas subportadoras está modulada independientemente por un flujo de datos de baja velocidad. OFDM tiene varios beneficios, incluida su robustez frente al desvanecimiento por trayectos múltiples y su arquitectura de receptor eficiente.

La Figura 2.10 muestra una señal OFDM con un ancho de banda de 5 MHz. Los símbolos de datos se modulan de forma independiente y se transmiten a través de un gran número de subportadoras ortogonales estrechamente espaciadas. En E-UTRA se encuentran disponibles QPSK, 16QAM y 64QAM como esquemas de modulación de enlace descendente. En el dominio del tiempo, se agrega un intervalo de guarda a cada símbolo. De esta manera, es posible combatir la interferencia entre símbolos (ISI) debido a la dispersión del retardo de los canales. La dispersión de retardo es el tiempo

entre el símbolo que llega a la primera señal multi-path y el último componente de señal multi-path, por lo general varios micro segundos ( $\mu\text{s}$ ) dependiendo del entorno, es decir, si se trata de un medio interior, rural, suburbano, o centro de la ciudad. El intervalo de guarda debe ser mayor que la dispersión de retardo máximo esperado. En E-UTRA, el intervalo de guarda es un prefijo cíclico que se inserta antes de cada símbolo OFDM.

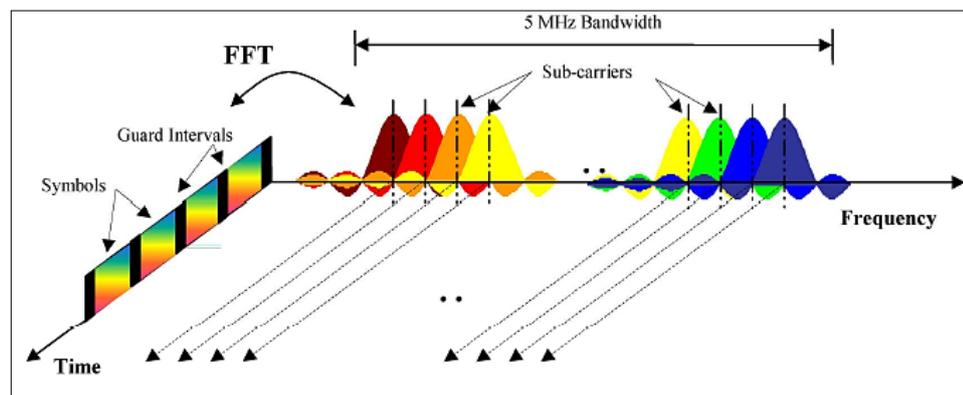


Figura 2. 10 Representación de la frecuencia vs tiempo de una señal OFDM  
Fuente: (Sukar & Pal, 2014)

## 2.5.2. OFDMA

A diferencia de un esquema de transmisión OFDM, OFDMA permite el acceso de múltiples usuarios en el ancho de banda disponible. A cada usuario se le asigna un recurso específico de tiempo-frecuencia. Como principio fundamental de E-UTRA, los canales de datos son canales compartidos, es decir, para cada intervalo de tiempo de transmisión (TTI) de 1 ms, un nuevo recurso de programación durante ese TTI.(Sukar & Pal, 2014)

Debido a la alta eficiencia espectral y la transmisión robusta en presencia del desvanecimiento multitrayectoria, el OFDMA se utiliza como esquema de modulación para el enlace descendente en los sistemas LTE. En el transmisor OFDMA, el espectro disponible se divide en número de subportadoras ortogonales. El espacio de la subportadora para el sistema LTE es de 15 KHz con una duración de símbolo OFDMA de  $66,67 \mu\text{s}$ . El flujo de datos de alta velocidad de bits pasa a través del modulador, donde se aplican esquemas de modulación adaptativos como BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM. Esta secuencia multinivel de símbolos modulados se convierte en componentes de frecuencia paralelos (subportadoras) mediante un convertidor de serie a paralelo, tal como se muestra en la Figura 2.11.(Sukar & Pal, 2014)

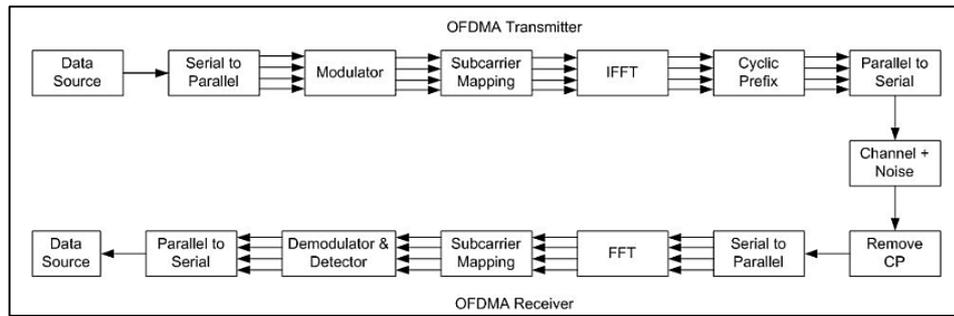


Figura 2. 11 Diagrama de bloques de un Sistema OFDMA

Fuente: (Sukar & Pal, 2014)

Se usa una banda de guarda entre los símbolos OFDMA para cancelar la interferencia entre símbolos en el receptor. En LTE, esta banda de protección se denomina “Prefijo Cíclico” (CP) y la duración del CP debe ser mayor que la respuesta al impulso del canal o la dispersión del retardo. El receptor no trata con el ISI, sin embargo, se debe tener en cuenta el impacto del canal para cada subportadora que haya experimentado cambios de amplitud y una fase dependiente de la frecuencia. En LTE, OFDMA utiliza dos tipos de CP, es decir, CP normal y CP extendido. El CP normal se utiliza para altas frecuencias (áreas urbanas) y CP extendido para frecuencias más bajas (áreas rurales). En el receptor, primero se sustrae el CP y luego las subportadoras se convierten de secuencia paralela a serie. La etapa FFT (Transformada de Fourier Rápida) convierte adicionalmente los símbolos en dominio de frecuencia seguido por un ecualizador y demodulador.(Sukar & Pal, 2014)

En el enlace descendente, las subportadoras se dividen en bloques de recursos. Esto permite que el sistema divida las subportadoras en partes pequeñas, sin mezclar los datos a través del número total de subportadoras para un ancho de banda dado. El bloque de recursos consta de 12 subportadoras para un único intervalo de tiempo de 0,5 ms de duración. La figura 2.12 muestra los diferentes números de bloques de recursos físicos para diferentes anchos de banda en LTE. Los parámetros de modulación para OFDMA de enlace descendente se mencionan en la figura 2.13.(Sukar & Pal, 2014)

Bandwidth (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
PRB Bandwidth (KHz)	180					
Subcarrier Bandwidth (KHz)	15					
Number of Resource Blocks	6	15	25	50	75	100

Figura 2. 12 Bloque de recursos físicos (PRB) para diferentes anchos de banda en LTE

Fuente: (Sukar & Pal, 2014)

PARAMETERS	VALUES					
Transmission Bandwidth (MHz)	1.25	2.5	5	10	15	20
Sub-carrier spacing	15 KHz					
Sub-frame duration	0.5ms					
Sampling Frequency (MHz)	1.92 (1/2x3.84)	3.84	7.68 (2x3.84)	15.36 (4x3.84)	23.04 (6x3.84)	30.72 (8x3.84)
FFT Size	128	256	512	1024	1536	2048
No. of Occupied Sub-carrier	76	151	301	601	901	1201
CP Lengths (us/sample)	Short					
	(4.69/9) x6 (5.21/10) x1	(4.69/18) x6 (5.21/10) x1	(4.69/36) x6 (5.21/40) x1	(4.69/72) x6 (5.21/80) x1	(4.69/108) x6 (5.21/120) x1	(4.69/144) x6 (5.21/160) x1
	Long					
	16.67/32	16.67/64	16.67/128	16.67/256	16.67/512	16.67/1024
No. of OFDM symbols per subframe (short/long CP)	7/6					

Figura 2. 13 Parámetros de modulación para OFDMA de enlace descendente en LTE  
Fuente: (Sukar & Pal, 2014)

### 2.5.3. SC-FDMA

Si bien el esquema OFDMA se considera óptimo para cumplir los requisitos LTE en enlace descendente, las propiedades OFDMA son menos favorables para el enlace ascendente. Esto se debe principalmente a las propiedades de relación pico / promedio de potencia (*“peak-to-average power ratio”*, PAPR) más débiles en una señal OFDMA, lo que da como resultado una mala cobertura de enlace ascendente y desafíos en el diseño del amplificador de potencia para el teléfono con batería, ya que requiere amplificadores de potencia muy lineales. (Gessner et al., 2012)

Entonces, el esquema de transmisión de enlace ascendente LTE para el modo FDD y TDD se basa en SC-FDMA (acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única) con prefijo cíclico. Las señales SC-FDMA cuentan con mejores propiedades de PAPR en comparación con una señal OFDMA. Esta fue una de las razones principales para seleccionar SC-FDMA como esquema de acceso de enlace ascendente LTE. Las características del PAPR son importantes para el diseño rentable de los amplificadores de potencia del UE. Sin embargo, el procesamiento de la señal SC-FDMA tiene algunas similitudes con el procesamiento de la señal OFDMA, por lo que la parametrización del enlace descendente y el enlace ascendente puede armonizarse. (Gessner et al., 2012)

En la estructura de trama tipo 1, una trama de radio de enlace ascendente consta de 20 ranuras de 0,5 ms cada una, y una subtrama consta de dos ranuras. La estructura de la ranura se muestra en la Figura 17 La estructura de la estructura tipo 2 también consta de diez subtramas, pero una o dos de ellas son subtramas especiales. Cada ranura lleva 7 símbolos SC-FDMA en el caso de configuración de prefijo cíclico normal y 6 símbolos SC-FDMA en el caso de una configuración extendida de prefijo

cíclico. El símbolo SC-FDMA número 3 (es decir, el 4º símbolo en una ranura) transporta la señal de referencia de demodulación, que se utiliza para la demodulación coherente en el receptor eNodeB, así como la estimación del canal. (Gessner et al., 2012)

En SC-FDMA, los datos se mapean en constelación de señal de acuerdo con la modulación QPSK, 16-QAM o 64-QAM, dependiendo de las condiciones del canal de manera similar a OFDMA. Considerando que, los símbolos QPSK / QAM no modulan directamente las subportadoras; estos símbolos pasan a través de un convertidor de serie seguido de un bloque DFT que produce una representación de dominio de frecuencia discreta de símbolos QPSK/QAM. (Sukar & Pal, 2014)

## **2.6. IMS (Subsistema Multimedia IP)**

IMS (Internet Multimedia Subsystem), se refiere a una arquitectura que utiliza para la transmisión de la información el protocolo IP y para el transporte de la señalización el protocolo SIP, permite a los dispositivos IP establecer conexiones punto a punto (“*peer to peer*”, P2P) de una manera fácil y segura. (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

Este subsistema fue definido en el Release 5 de la 3GPP, como parte del cambio de las redes de conmutación de circuitos hacia las redes de paquetes. Su desarrollo se efectuó con la colaboración de los organismos de estandarización 3GPP2 (Third Generation Partnership Project 2), ETSI y la IETF (Internet Engineering Task Force), fue mejorada en los Releases 6 y 7 de la 3GPP. IMS se incluyó en los estándares 3G, sin embargo, es en su aplicación sobre las redes LTE en donde se explota por completo todas sus funcionalidades. El objetivo de proveer servicios en redes de comunicaciones móviles a través de IMS es sustituir a largo plazo aquellos equivalentes ofrecidos actualmente en conmutación de circuitos. (Morales, 2015)

### **2.6.1. Características principales de IMS (Morales, 2015)**

Dentro de las características principales del Subsistema IMS se pueden mencionar:

- IMS utiliza SIP (“*Session Initiation Protocol*”) como protocolo de control de las sesiones (llamadas de voz o datos). SIP permite el establecimiento,

mantenimiento y finalización de las sesiones establecidas entre usuarios IMS.

- Soporta direccionamiento IPv4 e IPv4/IPv6. La principal ventaja de utilizar direccionamiento IPv6, es la disponibilidad de una mayor cantidad de direcciones IP.
- IMS soporta múltiples mecanismos de autenticación y brinda funciones de seguridad, tales como IPSec ESP (Internet Protocol Security - Encapsulating Security Payload), filtrado de la señalización SIP y ocultamiento de topología de red.
- Para el aprovisionamiento y transporte de servicios multimedia, IMS utiliza los protocolos RTP (Real Time Protocol) y RTCP (Real Time Control Protocol).
- Para el aseguramiento de QoS punto a punto, IMS utiliza los protocolos RSVP (*“Resource Servation Protocol”*) y DiffServ.
- La identificación de los usuarios, de servicios y de nodos de la red; se lo realiza mediante el uso de etiquetas con formato de correo electrónico, denominados URIs (*“Universal Resource Identifier”*).

### 2.6.2. Estructura del subsistema IMS

La aplicación de IMS ha sido implementada en diferentes tecnologías de red, tanto móviles como fijas. La estructura del subsistema posibilita el establecimiento de comunicaciones P2P basadas en IP con todo tipo de clientes bajo la calidad de servicio requerida; además direccionar funcionalidades como registro, seguridad y control de portadora entre otras, las mismas que son necesarias para completar la entrega del servicio. La figura 2.14 muestra la estructura del modelo por capas para proveer servicios basados en IMS, las capas también son conocidas como planos y son las siguientes: transporte, control y aplicación.(Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

- **Capa de transporte:** Representa la infraestructura de red IP, la cual depende directamente de la tecnología de acceso, esta proporciona el enrutamiento del flujo IP entre los elementos de la red.(Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)
- **Capa de control:** En esta capa se encuentra el subsistema IMS con elementos de establecimiento de sesiones SIP, así como elementos para la

interacción con redes telefónicas convencionales. (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

- **Capa de aplicación:** Se compone por los servidores de aplicación que contienen los datos asociados a los servicios que se proporcionan mediante IMS. También se encuentran elementos ligados a otras plataformas de servicios los cuales hace posible la provisión de servicios desde proveedores de aplicaciones externos (Application Service Providers, ASPs).(Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

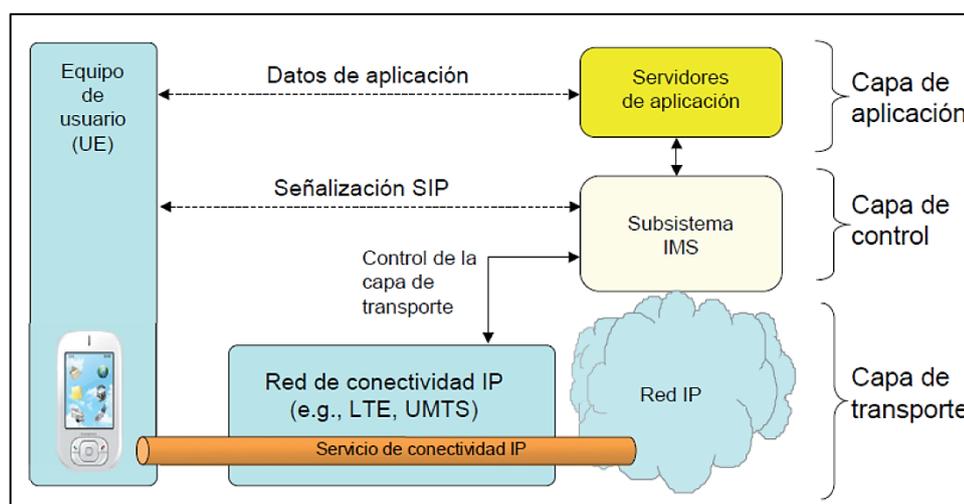


Figura 2. 14 Modelo de provisión de servicios en base al subsistema IMS.  
Fuente: (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

### 2.6.3. Arquitectura IMS

Los nodos que forman la red IMS son las entidades lógicas que tienen definidas las funciones desarrolladas por el grupo de estandarización 3GPP. A continuación, se describen las funciones de los principales elementos de la arquitectura IMS.

- **CSCF (“Call Session Control Function”):**

Es la función principal dentro de la red IMS. Está definida tanto por 3GPP como por 3GPP2 y utiliza el protocolo SIP (IETF SIP RFC 3261) para establecer, modificar y terminar una sesión multimedia. Es por tanto un servidor SIP, que procesa la señalización de dicho protocolo dentro de la red IMS, y desempeña las siguientes funciones:

- Función de control de sesión de llamada Proxy, P-CSCF (“Proxy Call Session Control Function”)

- Función de control de sesión de llamada i, I-CSCF (“Interrogatong Call Session Control Function”)
- Función de control de sesión de servicio, S-CSCF (“Serving Call Session Control Function”)
- Servicio de Emergencia, E-CSCF (“Emergency CSCF”)
- Función de Control de Pasarela de Salida, BGCF (“Break-out Gateway Control Function”)
- Función de Control de Entradas, BCF (“Break-in Control Function”).

➤ **P-CSCF (Proxy - Call Session Control Function):**

El P-CSCF es el primer punto de contacto entre el usuario y la red IMS, por lo tanto, es el elemento más vulnerable. Todas las peticiones iniciadas desde un terminal IMS se reciben en este nodo. Puede haber varios P-CSCF en una misma red, y cada uno atiende a un número determinado de terminales, dependiendo de su capacidad o licenciamiento. Otras funciones destacables son la de control de la seguridad, la red de acceso, calidad de servicio (QoS) y NAT (“*Network Address Translation*”).

El P-CSCF establece un número de asociaciones de seguridad IPsec hacia el terminal IMS, las cuales ofrecen protección integral. Una vez que el P-CSCF autentica al usuario, le confirma su identidad al resto de los nodos de la red, de tal manera que no se necesitarán futuras autenticaciones del usuario en los distintos nodos ya que estos creen en la información enviada por el P-CSCF. Desde el punto de vista de SIP, el PCSCF actúa como un servidor proxy SIP de entrada/salida, lo cual significa que todos los mensajes que intercambia el terminal IMS viajan a través del P-CSCF. El P-CSCF es asignado al terminal IMS durante el registro IMS y no cambiará de PCSCF hasta que este no cierre la sesión. Adicionalmente, el P-CSCF verifica que las solicitudes SIP (“*SIP Requests*”) enviadas por el terminal IMS sean correctas.

El P-CSCF también comprime y descomprime los mensajes SIP ya que incluye un compresor/descompresor de mensajes SIP. Los terminales IMS también disponen de esta función y la principal utilidad de esta funcionalidad es que al comprimir los mensajes SIP disminuye el tiempo de transmisión, cuestión que es muy útil en accesos con interface de radio. El P-CSCF debe incluir un PDF (“*Policy Decision Function*”),

los cuales deben estar integrados o implementados como una sola unidad. El PDF autoriza el uso de recursos y maneja también la Calidad de Servicio QoS.

➤ **I-CSCF (Interrogating - CSCF):**

El I-CSCF es el primer punto de contacto entre la red IMS del operador y otros proveedores de servicios. En situaciones de roaming y en sesiones de entrada hacia IMS, el I-CSCF es el punto de entrada conocido por la red IMS externa e indica el siguiente salto a realizar para la señalización. El I-CSCF mantiene una interfaz basada en el protocolo DIAMETER, hacia el SLF (*“Subscriber Location Functions”*) y el HSS (*“Home Subscriber Servers”*).

Las funciones principales que cumple el I-CSCF son:

- Direcciona al usuario en proceso de registro a un S-CSCF.
- Obtener la información de la ubicación del usuario y enrutar las peticiones SIP hacia el destino apropiado (por lo general hacia el S-CSCF).
- Encriptar partes de los mensajes SIP como el número de servidores en el dominio, nombres de los DNS o su capacidad, esta funcionalidad se conoce como THIG (*“Topology Hiding Inter-Network Gateway”*).
- Generar CDRs.

➤ **S-CSCF (Serving - CSCF):**

El S-CSCF conocido como el nodo central de la red IMS, es un servidor SIP encargado de controlar y mantener de la sesión del UE. Está involucrado durante todo el proceso de una llamada desde que inicia hasta que termina sin importar si la llamada es saliente o entrante. El S-CSCF es el nodo central del plano de señalización y es asignado durante el registro del UE. Actúa como gestor de las peticiones de registro SIP y guarda la información necesaria proporcionada por el HSS durante la fase de registro. Este nodo utiliza el protocolo DIAMETER en la interfaz de comunicación con el HSS. La información que toma del HSS está relacionada al perfil del usuario, donde también se encuentra toda la información de perfil del servicio. Para la correcta autenticación del usuario en la red, el HSS proporciona los vectores de autenticación del usuario.

Las principales funciones de control que desempeña este nodo son:

- Registro y des-registro de usuarios, de acuerdo con SIP RFC 3261, obteniendo los perfiles desde el HSS.
- Gestión de las sesiones: establecimiento, mantenimiento y liberación.
- Obtener de la HSS los vectores de autenticación y el perfil del usuario que está tratando de acceder a la red IMS.
- Actualización del HSS cuando los usuarios se registran.
- Rechazo de usuarios de acuerdo a ciertas políticas y limitaciones impuestas, por ejemplo, limitaciones en el ancho de banda.
- Posibilidad de actuar como Proxy SIP (RFC 3261) aceptando y atendiendo peticiones internamente o reenviándolas donde proceda.
- Enviar toda la señalización SIP que los terminales IMS intercambien.

➤ **HSS (Home Subscriber Server):**

Base de datos que contiene la información de usuario y suscriptor. La información almacenada incluye: la identidad de usuario, información de registro, parámetros de acceso, así como la información que permite la invocación de los servicios de usuario. El HSS se comunica con el I-CSCF y el S-CSCF para proporcionar la información sobre la localización del suscriptor y la información de suscripción del cliente, de esta manera, ayuda a las entidades de red a manejar las llamadas y las sesiones. Las principales funciones que desempeña este nodo son:

- Tratamiento de llamadas.
- Autorización de acceso.
- Autenticación.
- Gestión de movilidad (siguiendo la pista de qué entidad de control de sesión está sirviendo al usuario).
- Ayuda en el establecimiento de sesión y en el suministro y autorización de servicios.

➤ **SIP Application Server (AS).**

Toda las aplicación y servicio de IMS se ejecuta en los servidores de aplicación SIP. Un servidor de aplicación SIP puede estar dedicado a un solo servicio o a prestar varios servicios, pudiendo combinar los servicios desde servidores de aplicación diferentes, creando una experiencia unificada para el usuario.

➤ **MRF (Media Resource Function).**

El MRF proporciona servicios multimedia en la red e implementa funciones para gestionar y procesar flujos de voz, video, texto para hablar y transcodificación de datos multimedia. Un MRF normalmente está sólo involucrado cuando una aplicación IMS requiere proporcionar un servicio multimedia, utilizándose únicamente durante la aplicación. Adicionalmente, permite multiconferencias mezclando los flujos de varios participantes. El MRF está dividido en:

- **MRFC (Media Resource Function Controller):** Nodo de señalización que actúa como un agente de usuario SIP para el S-CSCF y controla los flujos de medios establecidos por el MRFP, basándose en información suministrada por el S-CSCF y el servidor de aplicaciones.
- **MRFP (Media Resource Function Processor):** nodo multimedia que provee la transcodificación esencial y funciones adaptables de contenido.

➤ **E-CSCF (Emergency-CSCF):**

Es identificado como entidad de llamadas de emergencia. Encamina las llamadas de emergencia de acuerdo a la ubicación de acceso de los usuarios a su correspondiente centro de llamadas de urgencia.

➤ **BGCF (Breakout Gateway Control Function):**

Es la entidad lógica que decide como enrutar las sesiones de telefonía iniciadas en la red IMS y destinadas a una PSTN (“*Public Switched Telephone Network*”) red de conmutación de circuitos, u otras redes inalámbricas conocidas como PLMN (“*Public Land Mobile Network*”).

El BGCF selecciona el MGCF (Media Gateway Control Function) requerido para el inter-funcionamiento con la PSTN y se encarga de transmitirle la señalización de control de sesión. Su función de enrutamiento se basa en números telefónicos. Provee la sesión de enrutamiento en el caso de que el S-CSCF no la puede proveer. Si el punto de interconexión se encuentra en otra red, el BGCF transfiere la sesión de señalización hacia el BGCF de la otra red. Cuando selecciona la red conectada a través de la PSTN, el BGCF puede utilizar configuraciones de enrutamiento locales o de la información recibida intercambiada con otros protocolos.

➤ **MGCF (Media Gateway Control Function):**

Su función principal es la interacción entre la red IMS y el plano de control de la PSTN o el dominio CS de la red móvil. Este nodo realiza la conversión en la sesión del inter-funcionamiento entre el protocolo SIP de la IMS y la PSTN, o entre el protocolo SIP de IMS y el ISUP/BICC del dominio CS. Controla al IM-MGW para completar la conversión en tiempo real entre la PSTN, y el plano de usuario de RTP del dominio IMS. Realiza el análisis numérico para las llamadas procedentes de la red PSTN y la señalización a los suscriptores de IMS, seleccionando el adecuado CSCF. El protocolo usando entre el MGCF y el MGW es el H.248.

➤ **SGW (Signaling Gateway):**

Una característica esencial de IMS es que la comunicación entre los diferentes componentes de la red está basada en IP; sin embargo, existen dos interfaces que no se apoyan en este protocolo y se utilizan para interactuar con una red tradicional (la PSTN o una red móvil antigua). Estas interfaces son: el camino de los flujos y el de señalización hacia la red antigua. El SGW evita que el MGCF soporte SS7. Su función es convertir SS7 a IP, cambiando las capas más bajas de SS7 a IP.

➤ **IMS ALG (IMS Application-Level Gateway)**

Nodo que proporciona la funcionalidad de aplicación necesaria a la pila de protocolos SIP/SDP para que interactúen aplicaciones IPv4 e IPv6. Cuando el IMS ALG recibe un mensaje SIP de los CSCFs o de una red externa SIP IPv4, cambia los parámetros apropiados de SIP/SDP, traduciendo las direcciones IPv6 a IPv4 y viceversa.

➤ **SBC (Session Border Controller):**

Se ubica en el límite de núcleo de red IMS, entre el terminal y el P-CSCF. Como proxy de señalización y de medios de la red IMS, se encarga de separar la red de acceso y el núcleo de la red IMS. Garantiza la interoperabilidad entre la red pública y red privada. Realiza funciones de NAT, cortafuegos, control de calidad de servicio y seguridad de la red.

Su función principal es gestionar las sesiones IMS (correlacionando señalización y flujo multimedia) para garantizar seguridad, calidad de servicio (QoS), acuerdos de

niveles de servicio (SLAs), NAT/FW transversal y otras funciones críticas para flujos IP en tiempo real. Puede ser usado para la traducción de direcciones; entre direcciones privadas y públicas IPv4 o entre direcciones IPv4 e IPv6.

➤ **CG (Charging Gateway):**

Nodo que se encuentra ubicado entre el núcleo de la red IMS (CSCF, MGCF, AGCF y AS) y los sistemas de aplicación (sistema de facturación, sistema de estadísticas, etc.). Utiliza un arreglo de discos IP-SAN de gran capacidad y escalabilidad para almacenar los archivos CDR. Monitorea los enlaces con los NEs en el proceso y colección de ACR (Accounting Request), y envía una alerta cuando el enlace de comunicación deja de operar. El CG construye los CDR basado en los mensajes ACR; procesa y envía los CDR al Sistema de Facturación empleado por el operador de Telecomunicaciones, a través de una interfaz unificada.

Entre sus funciones principales destacan:

- Soporta la colección en tiempo real de mensajes ACR proveniente de los NE (P/S/I-CSCF, MGCF, AGCF, AS) de IMS.
- Crea los CDR sobre la base de los mensajes ACR.
- Realiza la construcción de los CDR, tales como CDR verificación, el filtrado, la fusión y la asociación.
- Apoya el almacenamiento y copia de seguridad de los archivos CDR.
- Apoya el enrutamiento y el envío a los diferentes sistemas de aplicación, tales como sistema de facturación y el sistema estadístico de CDR.
- Ofrece gestión y supervisión, tales como configuración, seguridad, estadística y la alarma de rastreo de señalización.
- Proporciona herramientas del sistema de navegación, tales como registro, navegación CDR.

En la figura 2.15 se muestra la arquitectura simplificada del Subsistema IMS.

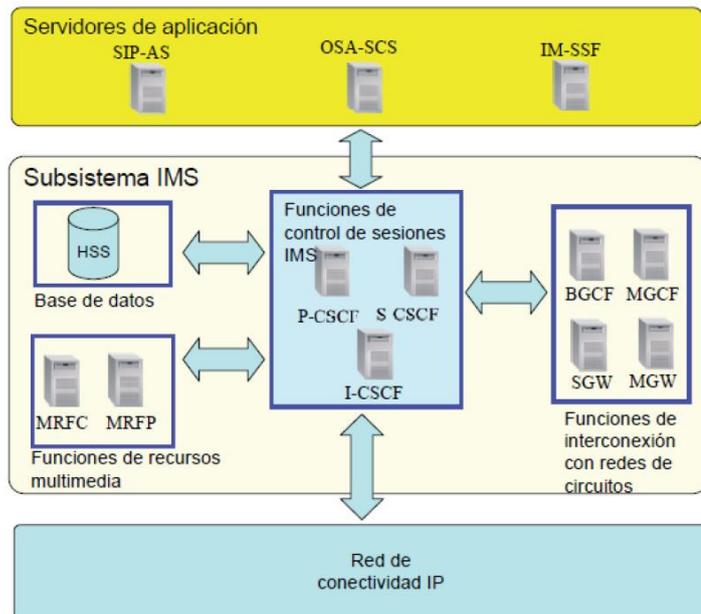


Figura 2. 15 Arquitectura simplificada del Subsistema IMS  
Fuente: (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

#### 2.6.4. Protocolos en IMS (Lara & Coral, 2017)

A continuación, se describen los principales protocolos de comunicación utilizados en IMS.

➤ **SIP (Session Initiation Protocol):** (Lara & Coral, 2017)

Protocolo definido por el grupo IETF (Internet Engineering Task Force) en la RFC 3261 para el plano de control y señalización de sesiones. Razón por la cual, el grupo 3GPP lo seleccionó como protocolo principal para la tecnología de IMS. Este protocolo permite registrar, establecer, modificar y finalizar sesiones multimedia, en donde se intercambia voz, video, texto, imágenes u otros archivos en tiempo real entre usuarios finales.

SIP realiza la comunicación entre usuarios (llamadas, videoconferencia o mensajería instantánea) por medio de los protocolos RTP, RTCP y SDP, en donde RTP/RTCP transportan los datos multimedia en tiempo real y SDP describe las características y capacidades en la sesión. Una de las características de SIP es que está basado en texto, ya que es un protocolo de señalización y no un protocolo de intercambio de datos de usuario, lo que hace que su implementación sea simple y flexible. Además, se fundamenta en el modelo cliente/servidor al igual que HTTP, en donde intercambia mensajes cortos de señalización y no grandes volúmenes de datos, y utiliza el concepto “Uniform Resource Location” o “URL SIP” al igual que SMTP,

empleando así algunas funcionalidades de los protocolos de internet existentes como HTTP y SMTP.

SIP define dos tipos de entidades: los clientes y los servidores tal como se detalla en la figura 2.16.

- **Servidor Proxy (Proxy Server):** Recibe las solicitudes de los clientes, hace las modificaciones pertinentes y las encamina a otros servidores.
- **Servidor de Redireccionamiento (Redirect Server):** Acepta solicitudes SIP, traduce la dirección SIP de destino en una o varias direcciones de red y las devuelve al cliente.
- **Agentes de Usuario (AU, User Agent):** Es una aplicación sobre un equipo de usuario final (un PC o un teléfono IP) que emite y recibe solicitudes SIP.
- **Registrador (Registration Server):** Gestiona el registro de los usuarios, aceptando las solicitudes SIP REGISTER. El usuario indica al registrador por un mensaje REGISTER la dirección donde está localizado (dirección IP) y el registrador actualiza una base de datos de localización.

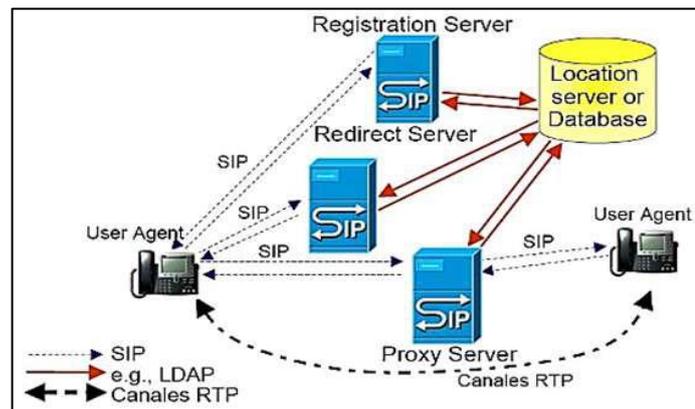


Figura 2. 16 Entidades SIP  
Fuente: (Lara & Coral, 2017)

➤ **Tipos de mensajes SIP** (Lara & Coral, 2017)

Los mensajes SIP son utilizados para establecer la conexión y el control de las llamadas. Existen dos tipos de mensajes SIP: Request (petición) y Response (respuesta).

➤ **Mensaje de petición:**

Existen seis métodos básicos SIP que describen las peticiones de los clientes al establecer una comunicación tal como de muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2. 3 Clases de peticiones SIP

MENSAJE	FUNCIÓN
INVITE	Inicio de llamada
ACK	Confirmar el establecimiento de una sesión.
OPTION	Consulta a otro host sobre las capacidades requeridas sobre la sesión.
BYE	Finaliza una sesión previamente establecida.
CANCEL	Cancela una petición pendiente.
REGISTER	Registra un cliente SIP

Fuente: (Lara & Coral, 2017)

➤ **Mensaje de respuesta:**

Una vez recibidas y procesadas las solicitudes SIP, el destinatario de este requerimiento devuelve una respuesta SIP. Existen seis clases de respuestas:

Tabla 2. 4 Clases de respuestas SIP

CLASE	INTERPRETACIÓN	DESCRIPCIÓN
1xx	Información	La petición fue recibida y está en proceso de tratamiento.
2xx	Éxito	La petición fue recibida, entendida y aceptada.
3xx	Redirección	La petición necesita otros procesos antes de determinar si se realiza o no.
4xx	Errores del cliente	La petición no es soportada o interpretada por el cliente.
5xx	Errores del servidor	La petición supuestamente válida ha fracasado por fallas en el servidor.
6xx	Fallas globales	La petición no puede ser procesada por ningún servidor.

Fuente: (Lara & Coral, 2017)

➤ **SDP (Session Description Protocol)**

Protocolo de la capa de aplicaciones definido por el grupo de estandarización IETF, el cual describe los parámetros que permiten notificar, iniciar y establecer sesiones multimedia. Por medio de SDP, los usuarios de una sesión pueden mostrar sus capacidades multimedia y especificar el tipo de sesión que desean establecer. Además, SDP permite a los usuarios finales decidir el flujo multimedia que tendrá la sesión como voz, audio, video, etc., los códecs necesarios para soportar cada flujo y las configuraciones de los mismos.

La carga SDP se encuentra en el cuerpo de los mensajes SIP, donde la información dentro del cuerpo SDP se encuentra estructurada de la siguiente manera: (Lara & Coral, 2017)

- Descripción de la sesión.
- Descripción de tiempos.
- Descripción multimedia.

➤ **DIAMETER** (Lara & Coral, 2017)

El desarrollo del protocolo Diameter está basado en el protocolo RADIUS, el cual da soporte a las políticas y protocolos de autenticación, autorización y contabilidad (*AAA, Authentication, Authorization and Accounting*) en el acceso de los usuarios a la red IMS. En IMS, el S-CSCF, I-CSCF y los servidores de aplicación SIP usan Diameter en la capa de servicio y en el intercambio de la información de usuario con el servidor de base de datos HSS. El protocolo Diameter se puede dividir en:

- **Protocolo Base Diameter:** Usado para negociar las capacidades y el control de errores.
- **Aplicaciones Diameter:** Define funciones de cada aplicación disponible.

➤ **RTP** (Lara & Coral, 2017)

El protocolo de transmisión en tiempo real RTP (*Real Transport Protocol*) es definido por el grupo IETF en la RFC 3550, el cual permite el intercambio en tiempo real de servicios multimedia como voz, video, datos, etc., entre dos usuarios finales. Además, permite identificar el tipo de códec, implementar los números de secuencia de los paquetes IP, monitorización en el envío de los paquetes al destino e identificar el tipo de información transmitida. RTP transporta los mensajes sobre paquetes, los cuales tiene la siguiente estructura:

- Cabecera de longitud fija de 12 octetos.
- Cuerpo del mensaje o carga útil de longitud variable.

RTP trabaja sobre el protocolo de transporte UDP/IP, pero es importante aclarar que no garantiza la entrega de los paquetes en el destino y no proporciona calidad de servicio (QoS) en una comunicación en redes IP, razón por la cual, RTP utiliza el protocolo de control RTCP.

➤ **RTCP** (Lara & Coral, 2017)

El protocolo de control de tiempo real RTCP (*Real-Time Transport Control Protocol*) controla el flujo multimedia enviado por RTP. RTCP es fundamental, ya que

transmite mensajes de control periódicos a todos los participantes de la sesión, enviando el identificador de origen RTP y monitorizando los parámetros de QoS de la sesión, ya que incluye información sobre los paquetes perdidos, retardo, “jitter”, entre otras. El control del flujo multimedia se realiza por medio de cinco tipos de paquetes:

- **SR (Sender Report):** Tiene estadísticas para la transmisión y recepción de paquetes IP de los participantes de la sesión que son emisores.
- **RR (Receiver Report):** Tiene estadísticas de recepción de una sesión para los usuarios que son receptores, pero no son emisores.
- **SDES (Source Description):** Brinda datos de descripción de los usuarios, tales como: nombre, e-mail, teléfono, etc.
- **BYE:** Indica a un usuario cuando ha terminado su participación en una sesión.
- **APP:** Paquete de señalización específico para una **aplicación**.

## 2.7. Voz sobre LTE (VoLTE)

### 2.7.1. Definición

VoLTE se define como un servicio *Voice Over IP* (VoIP) que difiere de otras aplicaciones VoIP OTT actuales, tales como *Whatsapp*, *Skype* y *FaceTime* ya que garantiza la QoS de una llamada de voz a travez de la red LTE. El perfil básico de VoLTE se encuentra definido por el *GSMA IR.92-IMS Profile for Voice and SMS*. Este servicio es la respuesta adoptada por el 3GPP para las llamadas de voz en 4G LTE, sin embargo, ya que la red LTE carece de un núcleo CS el despliegue de VoLTE puede ser lento en comparación con la implementación de la red de datos de LTE, debido a que VoLTE exige la implementación del core IMS. (Hureimi Facuse & Valenzuela Cano, 2017)

Por esta razón, diferentes desarrolladores propusieron distintas soluciones, entre las cuales destacan: CSFB (*Circuit Switching Fall Back*), SV-LTE (*Simultaneous Voice and LTE*) y VoLGA (*Voice over LTE via Generic Access*). (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

CSFB fue adoptado como el mecanismo de llamadas de voz auxiliar y mandatorio para las redes LTE cuando no se cuenta con una red IMS en operación. Esta solución se ha estandarizado en la especificación 3GPP 23.272. El uso de CSFB

permite al terminal móvil realizar una serie de procesos para que se reciban e inicien las llamadas de voz en las tecnologías 2G Y 3G, estas llamadas permanecen en el dominio CS hasta que se completen. (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

VoLTE emplea la codificación AMR (*Adaptive Multi-Rate Audio*), siendo recomendada la utilización de Adaptive Multi-Rate Wide Band audio codec (AMR-WB) hasta el release 11, sin embargo, cabe destacar que en el reelease 12 surgió una nueva familia de códecs llamada Enhanced Voice Services codec (EVS). (Hureimi Facuse & Valenzuela Cano, 2017)

### 2.7.2. Ventajas y Desventajas de VoLTE

Dentro de las principales ventajas y desventajas de VoLTE sobre las tradicionales llamadas de voz CS y otro tipo de llamadas VoIP destacan:

➤ **Ventajas** (Hureimi Facuse & Valenzuela Cano, 2017)

1. **Garantía de QoS:** la tecnología VoLTE asegura un nivel óptimo de QoS, versus otras aplicaciones de voz sobre IP (VoIP), y no maneja el modelo de máximo esfuerzo (*Best Effort*).
2. **Voz HD:** la tecnología VoLTE utiliza la codificación AMR-WB, con una velocidad de 12.65 Kbps, siendo mayor con relación a la tecnología 2G/3G y telefonía fija no IP que operan a una velocidad de 8 Kbps. Además, el rango de frecuencias está en el rango 50-7000 Hz, lo que permite mejorar la clasificación MOS (Mean Opinion Score).
3. **Conversaciones enriquecidas:** la tecnología VoLTE es gestionado por el subsistema IMS, el cual agrupa el conjunto de servicios denominado RCS. Es decir, que puede reunir funcionalidades de videollamadas, transferencia de datos, adjuntar geolocalización o imágenes a la llamada, traducción simultánea durante la misma, etc.
4. **Conexiones más rápidas:** en la tecnología LTE el tiempo de establecimiento de llamada es menor en relación con las tecnologías 2G y 3G. Por ejemplo, los sistemas basados en CS, el tiempo de establecimiento de llamadas es alrededor de 5 a 8 s, mientras que en la tecnología VoLTE el tiempo es inferior a 1 o 2 s.

5. **Menor consumo de batería:** en la tecnología VoLTE cuando se realizan llamadas estas no consumen mucha energía con relación a otras aplicaciones VoIP OTT, como Skype o Facetime.
6. **Integración con Wi-Fi:** la tecnología VoLTE puede trabajar con conexión Wi-Fi, ayudando así a reducir la tarifa de datos.

➤ **Desventajas** (Hureimi Facuse & Valenzuela Cano, 2017)

1. **Incompatibilidad de terminales móviles:** la mayoría de los dispositivos o terminales móviles no tienen la capacidad de gestionar llamadas en la tecnología VoLTE. Es decir, que los dispositivos móviles pueden realizar llamadas mediante las redes 2G y 3G utilizando CSFB.
2. **Incompatibilidad de servicios:** pocos proveedores de servicios de comunicaciones móviles VoLTE implementan el conjunto de servicios RCS, lo que ocasiona que la mayoría de los servicios que ofrece VoLTE no sean compatibles.
3. **Nuevo esquema tarifario:** no hay una estandarización de tarifas de servicios para la tecnología VoLTE, por lo que depende de los proveedores de servicio móvil implementar esquemas tarifarios.

### 2.7.3. Estructura de VoLTE

VoLTE incluye voz en full dúplex, ya sea en un formato de comunicación uno-a-uno o uno-a-muchos. La Figura 2.17 muestra una versión simplificada de la arquitectura de comunicación VoLTE. (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

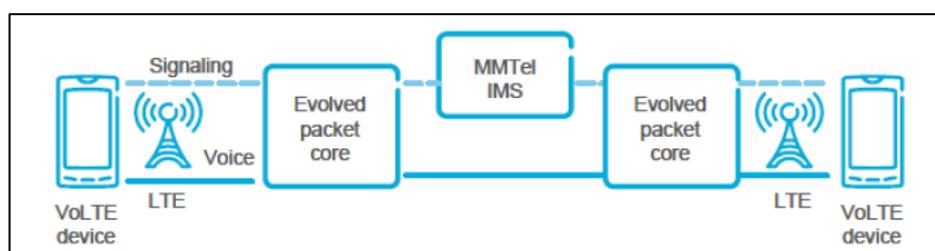


Figura 2. 17 Estructura simplificada de VoLTE  
Fuente: (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

Sin embargo, Ya se puede conocer una estructura más completa de VoLTE en donde intervienen distintos elementos del EPC y IMS, los mismos que fueron estudiados anteriormente. Es importante mencionar que no todos los elementos

pertenecientes a la EPC e IMS son utilizados para la transmisión de voz. (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

A continuación, la figura 2.18 detalla la estructura lógica de VoLTE, donde se puede observar que la arquitectura se divide en cuatro elementos principales, con las mismas interfaces descritas anteriormente; el equipo de usuario, la red de acceso, la red troncal EPC y IMS. El equipo de usuario debe de ser capaz de trabajar con VoLTE.(Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

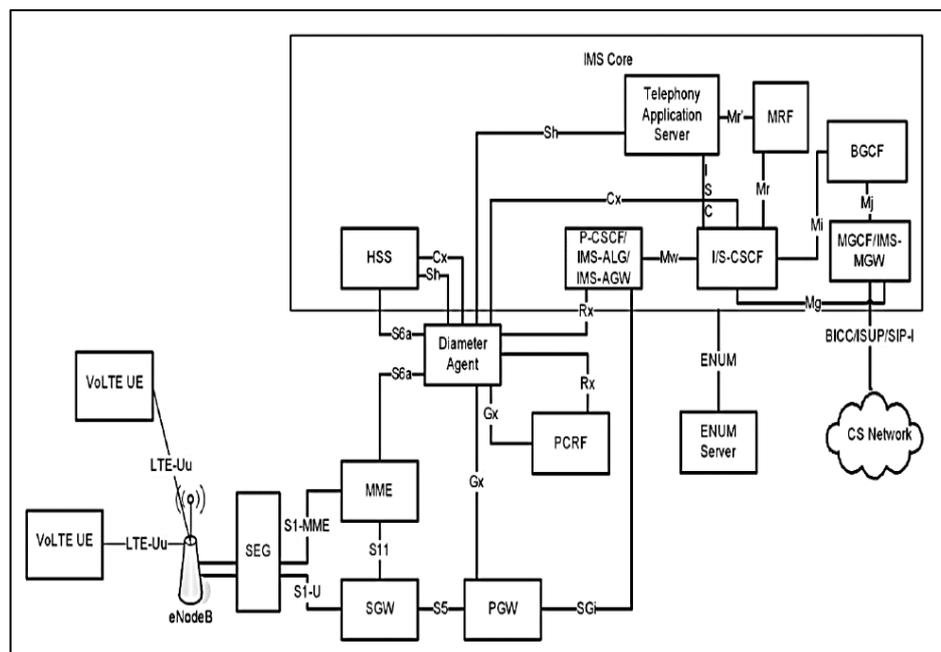


Figura 2. 18 Arquitectura lógica de VoLTE  
Fuente: (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

Dentro de la red de acceso destaca una nueva entidad conocida como SEG (Security Gateway) el cual es usado para generar y terminar asociaciones seguras entre el eNodeB y el EPC. La figura 2.18. también demuestra las entidades de la EPC tales como MME, PCRF, PGW y SGW, las mismas que fueron definidas anteriormente. Como parte del EPC se observa como equipamiento nuevo el DRA (*Diameter Routing Agent*), se encuentra definido en el IETF RFC 3888, su función es proporcionar capacidades de enrutamiento para garantizar el enrutamiento correcto de los mensajes en tiempo real. El DRA fue presentado por el 3GPP para hacer frente al aumento del diámetro de tráfico de señalización y creciente complejidad de las redes LTE. En la Figura 2.28. también se observa el ENUM Server (*E.164 Number Mapping*) su función es permitir la traducción de números E.164 hacia URLs SIP utilizando el DNS para

realizar el ruteo de mensajes de las sesiones de IMS. (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

#### 2.7.4. IMS en VoLTE

El subsistema IMS es el elemento más importante para el funcionamiento de VoLTE. La figura 2.19 detalla la composición del subsistema IMS para VoLTE.

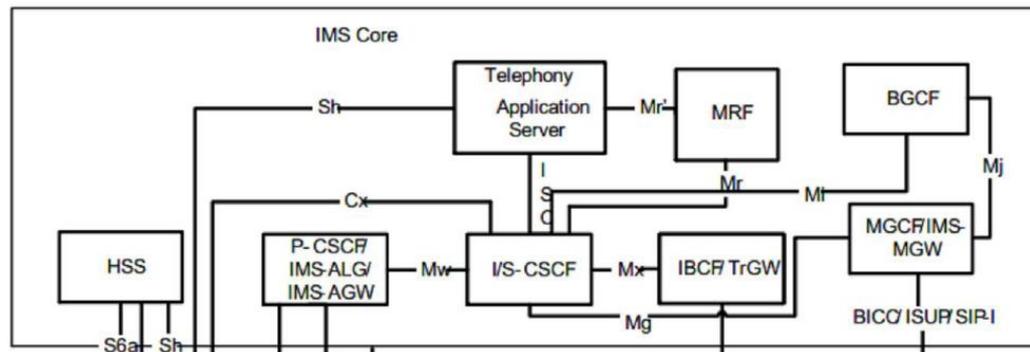


Figura 2. 19 Subsistema IMS para VoLTE  
Fuente: (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

La figura 2.19. demuestra una variedad de elementos ya estudiados anteriormente con sus respectivas interfaces, por lo tanto, a continuación, se explica únicamente los elementos considerados como nuevos.

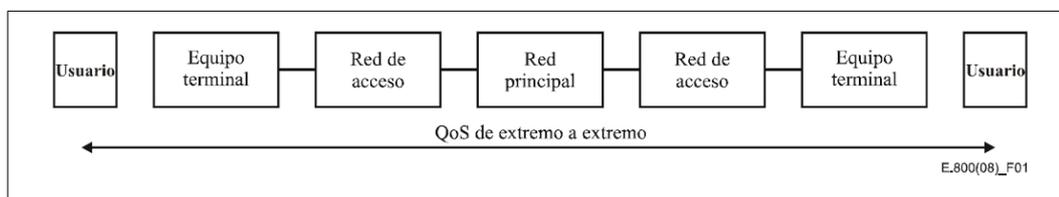
- **TAS (Telephony Application Server):** Es un servidor de IMS que provee soporte para un conjunto mínimo de servicios MMTel (*Multimedia Telephony*) definidos por el 3GPP. (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)
- **IBCF/TrGW (Interconnection Border Control Function/Transition Gateway):** Elemento responsable del plano de control en la red, su principal función es la interconexión con otras PMN. Es importante mencionar que durante una llamada de VoLTE, el equipo de usuario tiene que iniciar sesión en el IMS mediante SIP lo cual se lleva a cabo en el PCSCF. Una vez iniciada sesión, el tráfico de voz es transportado mediante RTP. (Jiménez & Del Carmen de los Santos, 2015)

## CAPITULO III: ANÁLISIS DE QoS y QoE PARA EL SERVICIO DE VoLTE

### 3.1. Calidad de servicio conceptos generales

Según la recomendación de la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones), se define como calidad de servicio (**QoS, *quality of service***) a la totalidad de las características de una red o un servicio de telecomunicaciones que determinan su capacidad para satisfacer las necesidades explícitas e implícitas del usuario. Se considera también como la capacidad que tiene una red de proveer diferentes niveles de servicio para asegurar distintos perfiles de tráfico.

La QoS de extremo a extremo depende de las contribuciones que aporten los componentes que se detallan en la figura 3.1 a continuación.



**Figura 3. 1: Esquema de contribuciones a la QoS de extremo a extremo**

Fuente: (UIT-T, 2008)

La configuración que expone la figura 3.1. corresponde al servicio convencional con usuarios a cada extremo de la conexión. No obstante, también puede aplicarse a los servicios ofrecidos por un proveedor de servicios, en un extremo, y un usuario o usuarios, en el otro. Es importante recalcar que la contribución a la QoS de extremo a extremo puede depender de la variabilidad de la calidad de funcionamiento del equipo terminal, tanto como de la red de acceso, ya que ésta puede presentar una combinación de medios de acceso y de tecnologías utilizadas para un servicio concreto (por ejemplo, inalámbrico, cable, ADSL, etc.). En cuanto a la red principal, puede ser de un único proveedor o la concatenación de redes de distintos proveedores, por lo tanto, su contribución de QoS a la calidad de funcionamiento de extremo a extremo dependerá de las contribuciones aportadas por cada uno de los componentes de la red (ya sea un único proveedor o varios); la tecnología utilizada (multiplexación digital, IP, etc.), los medios de transmisión (aire, cable óptico o metálico) y otros factores. (UIT-T, 2008)

Para especificar la QoS de extremo a extremo es necesario determinar las condiciones operativas específicas en que un servicio se proporciona a través de la

conexión (sin conexión u orientado a la conexión). La QoS también puede verse alterada, dadas unas condiciones operativas específicas, por condiciones del entorno, como el tráfico y el enrutamiento.(UIT-T, 2008)

### **3.2. Calidad de servicio (QoS) en LTE**

Una red LTE muestra un enfoque exclusivo al uso de datos de manera All IP (todo con Internet Protocol), de modo que las llamadas deben ser cursadas mediante Voz sobre IP (VoIP) en una red de conmutación de paquetes, lo mismo que se logra haciendo uso de un núcleo de paquetes IP Multimedia Subsystem (IMS), a través de servidores Session Initiation Protocol (SIP). Por esta razón, se heredan los problemas de un servicio ofrecido por mejor esfuerzo mediante IP, surgiendo la gran necesidad de establecer Calidad de Servicio (QoS), mecanismo que establece prioridad de tráfico según las aplicaciones a las cuales acceden los usuarios. De esta manera, resulta obligatorio monitorear el correcto desempeño de este mecanismo para cumplir con los acuerdos de nivel de servicio establecidos con el usuario. (Fortún, 2017)

Como se han mencionado anteriormente, los objetivos de LTE son proporcionar una alta eficiencia, baja latencia, flexibilidad espectral y velocidades móviles superiores. La QoS prioriza el tráfico de datos dependiendo del tipo de aplicación que esté utilizando el ancho de banda, ajustando las necesidades a las circunstancias. Entre las aplicaciones se incluyen el acceso móvil a la Web, telefonía IP, servicios de juegos, TV móvil de alta definición, videoconferencias, entre otros. Generalmente, múltiples aplicaciones pueden estar corriendo simultáneamente en el equipo del usuario, teniendo cada una diferentes requerimientos de QoS. Por ejemplo, un UE puede estar realizando una llamada de VoIP, mientras que al mismo tiempo navega por la web o descarga ficheros. VoIP posee requerimientos más estrictos de QoS en términos de delay y jitter que la navegación web o la descarga de ficheros. Sin embargo, en el caso de la pérdida de paquetes la situación se invierte. La diferenciación de QoS en LTE está dada por la portadora EPS introducida por el 3GPP. Una portadora EPS puede ser del tipo Razón de Bit Garantizada (Guaranteed Bit Rate, GBR) o del tipo Razón de Bit No Garantizada (Non-GBR, NGBR). (Fortún, 2017)

La portadora GBR puede emplearse en aplicaciones como VoIP. Este tipo de portadora tiene un valor GBR asociado, para el cual son asignados permanentemente

recursos de transmisión dedicados al establecerse o modificarse la portadora, por ejemplo, mediante una función de control de admisión en el eNB. En caso de que existan recursos disponibles se pueden permitir razones de bits superiores a la GBR. En tales casos, el parámetro Máxima Razón de Bit (Maximum Bit Rate, MBR), que puede también estar asociado a una portadora GBR, establece un límite superior en la razón de bit que puede esperarse. La portadora NGBR no garantiza ninguna razón de bit específica. Este tipo de portadora puede usarse para aplicaciones como la navegación web y la descarga de ficheros. Para estas portadoras no se asignan recursos de ancho de banda de forma permanente.(Fortún, 2017)

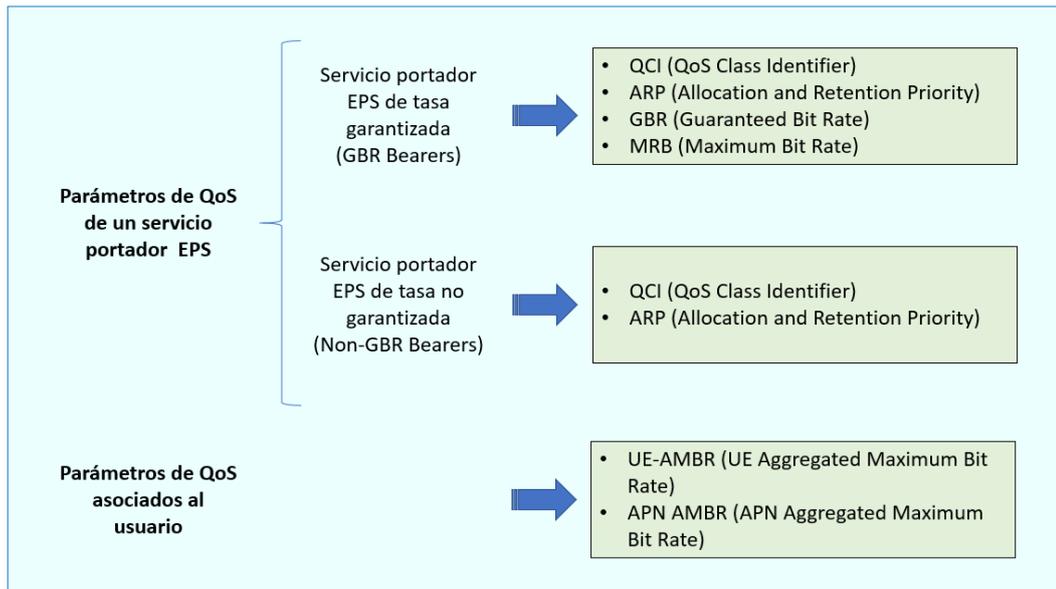
### 3.3. Parámetros de QoS en LTE (Fortún, 2017)

A continuación, se muestran los parámetros de comportamiento de los proveedores de servicios de portador (EPS) en la calidad de servicio (QoS) en redes LTE:

- **Identificador de clase de QoS:** QCI (QoS Class Identifier) es utilizado como referencia para permitir parámetros delimitados en cada nodo de la red LTE que logran controlar el método de transferencia de paquetes a nivel de portadora.
- **Prioridad de asignación y retención (ARP):** ARP (Allocation and Retention Priority) contiene información acerca del nivel de prioridad (escalar), capacidad de derecho de prioridad (bandera) y vulnerabilidad de derecho de prioridad (bandera). El propósito fundamental de ARP es decidir si una solicitud de establecimiento/modificación de portadora puede ser aceptada o necesita ser rechazada debido a limitaciones de recursos.
- **Velocidad de bits garantizada (GBR):** GBR (Guaranteed Bit Rate) expresa la tasa de bits que entrega la portadora EPS.
- **Máxima velocidad de bits (MBR):** MBR (Maximum Bit Rate) restringe la tasa de bits que es entregada por la portadora EPS.

Asimismo, estos parámetros son perfeccionados con otros dos parámetros añadidos al tipo de contrato de cada usuario. En la figura 3.2 se muestra el conjunto de parámetros de QoS para la tecnología LTE. Cada proveedor de servicios de portador (por ejemplo, Claro, CNT, Movistar) tienen dos parámetros asociados: (1) QCI y (2)

prioridad de retención y asignación (ARP). En consecuencia, el parámetro QCI establece el comportamiento del usuario del proveedor de servicios de portador (EPS). La tabla 3.1 muestra una mejor perspectiva de QCI en la que el valor de prioridad es gestionado por el planificador para establecer la asignación de recursos. Mientras, que ARP se utiliza en el plano de control como un indicador de prioridad en los procesos de establecimiento, modificación, desactivación de un servicio portador para independizar recursos que correspondan a servicios más prioritarios. (Fortún, 2017)



**Figura 3. 2: Parámetros de QoS en el sistema LTE**

Fuente: (Fortún, 2017)

QCI	Tipo de recurso	Prioridad	Presupuesto de demora (ms)	Razón de paquetes perdidos y erróneos	Servicios
1	GBR	2	100	$10^{-2}$	Llamadas de voz
2	GBR	4	150	$10^{-3}$	Videollamadas
3	GBR	5	300	$10^{-6}$	Video bajo demanda
4	GBR	3	50	$10^{-3}$	Juego en tiempo real
5	NGBR	1	100	$10^{-6}$	Señalización IMS
6	NGBR	7	100	$10^{-5}$	Voz y video en vivo, juegos interactivos
7	NGBR	6	300	$10^{-6}$	Video bajo demanda
8	NGBR	8	300	$10^{-6}$	Servicios basados en TCP (www, e-mail)
9	NGBR	9	300	$10^{-6}$	Servicios basados en TCP (www, e-mail)

**Tabla 3. 1 QCI estandarizados en LTE**

Fuente: (Fortún, 2017)

El parámetro QCI delimita el tipo de servicio que clasifican los servicios de velocidad de bits garantizada (GBR) y servicio de velocidad de bits no garantizada (NGBR). Una particularidad significativa en los servicios GBR es que son sometidos a control de admisión, debido a que su activación conlleva la reserva de un definido volumen de recursos de transmisión para lograr asegurar esa rapidez de datos. Sin embargo, en la situación de los servicios portadores NGBR, no resulta rigurosamente primordial pasar un control de admisión debido a que tienen la posibilidad de experimentar pérdidas de paquetes en situaciones de congestión. Además de los límites de QoS designados a cada servicio portador EPS, un cliente del sistema LTE tiene asociado 2 límites extras: UE-AMBR (Máxima Razón de Bit Agregada en el UE) y APN-AMBR (Máxima Razón de Bit Agregada en el APN). Los dos parámetros indican la máxima tasa de transferencia en bits que de manera agregada van a poder experimentar el grupo de servicios portadores EPS con NGBR. El primero delimita la tasa máxima del dispositivo móvil (cliente o usuario) y el segundo además delimita la tasa agregada máxima del mismo, aunque asociada a una cierta red externa. Dichos parámetros son parte del perfil de suscripción del cliente. (Fortún, 2017)

#### **3.4. Requerimientos de calidad de servicio en redes VoLTE**

Actualmente, las telecomunicaciones están cada vez más centradas en el usuario y, por esta razón, los operadores de red deben contar con la capacidad de medir la experiencia del usuario para evitar problemas de calidad en la red, antes de que el usuario los perciba. Para ello, es fundamental establecer una relación entre la Calidad de Experiencia (QoE) percibida por el cliente y la Calidad de Servicio (QoS) ofrecida por la red. (Vaser & Maggiore, 2019)

La Calidad de servicio (QoS) representa la capacidad de la red para proporcionar un servicio a un nivel de rendimiento garantizado, y se mide mediante parámetros cuantitativos denominados indicadores clave de rendimiento (*"KPI, Key Performance Indicators"*), como por ejemplo la pérdida de paquetes, delay y jitter. Por otro lado, QoE (*Quality of Experience*) define la calidad percibida subjetivamente por el usuario final y brinda información sobre qué tan bien la red satisface las necesidades del usuario. La QoE se mide mediante parámetros cualitativos, denominados Indicadores Clave de Calidad (KQI), como "muy buena", "buena", "mala". (Vaser & Maggiore, 2019)

Por lo que respecta a la calidad de un servicio en tiempo real como Voice over LTE, el Mean Opinion Score (MOS) se considera el parámetro más importante a considerar. Para obtener la QoE percibida por el cliente, la monitorización MOS debe ser realizada en un dispositivo final, lo más cercano posible al usuario. (Vaser & Maggiore, 2019)

#### 3.4.1. QoS aplicada en redes VoLTE (Fortún, 2017)

Se necesita llevar a cabo con determinados Indicadores Clave o Medidores de Funcionamiento (*Key Performance Indicator, KPI*) para consumir con los criterios de QoS que demanda una red VoLTE. Los KPI más relevantes para tener en cuenta son:

- **Retardo de paquetes de extremo a extremo (*End to End Packet delay*):** este parámetro entrega el retardo total del paquete de voz, o sea, el tiempo a partir de que se emite el sonido por el dispositivo móvil transmisor hasta que es percibido por el proveedor receptor.
- **Variación del retardo del paquete (*Packet Delay Variaton (PDV)*):** este parámetro entrega la diferenciación del retardo extremo a extremo entre todos los paquetes recibidos por el dispositivo móvil del cliente.
- **S1 Delay:** tiene relación con el retardo entre el eNodeB y EPC. Es decir, que este parámetro entrega la métrica del tiempo dado por un paquete en cruzar la red LTE a partir del eNodeB hasta el EPC.
- **Tasa de pérdida de paquetes (*Packet Loss Rate, PLR*):** entrega el número de paquetes de voz que se perdieron en la red ocasionado a la congestión de la red LTE.

Para una valoración eficiente de QoS en sistemas VoLTE se hace primordial la exploración y la administración de los recursos de:

- Códec de voz
- Rasgos de QoS LTE: Portador y Calidad de QCI
- Mejora de enrutamiento de red IP *network routing enhancement (DSCP mapping)* Servicio Diferenciado de Punto de Código, *Differentiated services code point*.
- El deterioro de la red (congestiones de la red o fallas)

Las técnicas de codificación y decodificación resultan muy relevantes para gestionar la transmisión o recepción de una señal digital buena. Para la red LTE estas técnicas tienen que integrarse con sus tipos de administración de QoS implementados a nivel de red

(Portador de EPS y QCI), Tipo de Servicio (ToS) y criterio de planeamiento DSCP, derogación de congestión de red.

### 3.4.2. MOS

El parámetro MOS es el KPI más importante que se utiliza para evaluar la QoS de VoLTE y poder estimar una QoE. Actualmente, una evaluación de MOS se realiza en escenarios de prueba activos, donde los dispositivos de prueba comerciales están equipados con herramientas específicas, con el fin de predecir la Evaluación de la Calidad de la Audición Objetiva Perceptiva (POLQA), un modelo de Referencia Completa establecido en la Rec. UIT-T. P.863. Esta estimación se puede hacer solo con unos pocos teléfonos, por lo que el valor no es estadísticamente relevante, ya que el número de muestras es muy pequeño. (Vaser & Maggiore, 2019)

La tabla 3.2. muestra los valores MOS y su relación con la percepción de QoS de una llamada por parte de los usuarios finales.

<b>Mean Opinion Score (MOS)</b>		
<b>MOS</b>	<b>Calidad</b>	<b>Percepción del usuario</b>
5	Excelente	Imperceptible
4	Buena	Perceptible pero no molesta
3	Suficiente	Ligeramente molesta
2	Pobre	Molesta
1	Mala	Muy molesta

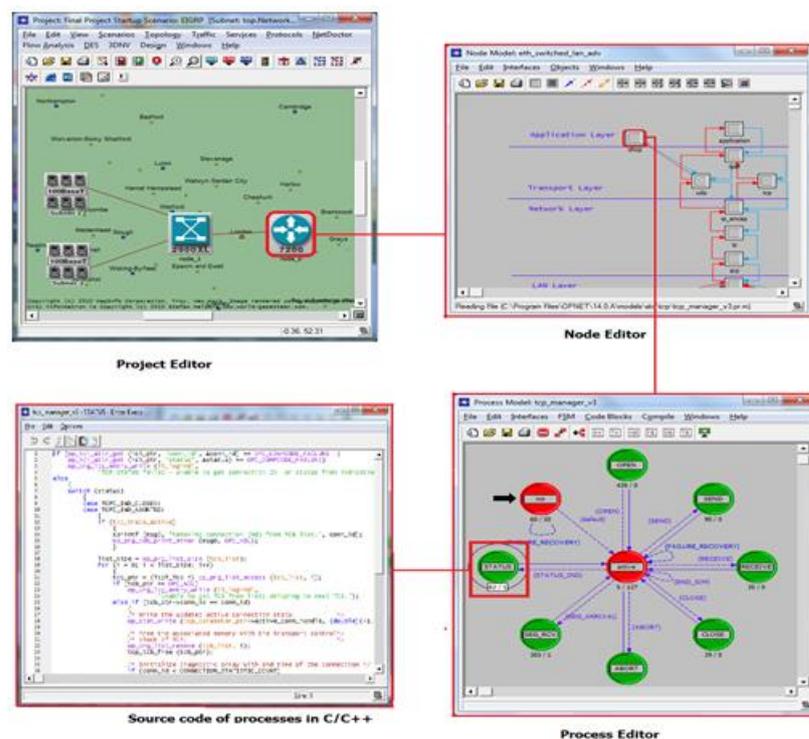
**Tabla 3. 2 Parámetros de MOS y percepción de QoS por el usuario final**  
Fuente: (Fortún, 2017)

### 3.5. Análisis de la plataforma de simulación Opnet Modeler

La evaluación del rendimiento de cualquier modelo de red diseñado es muy importante, por lo que en la práctica se utilizan diferentes simuladores para simular los modelos de red desde distintas perspectivas. En este trabajo de titulación, la simulación de los modelos de red VoLTE diseñados se implementa mediante el software OPNET Modeler que analiza la capacidad y el rendimiento de extremo a extremo del sistema. El resto de las secciones del presente capítulo mostrará los detalles del modelado de la red, su implementación y su configuración.

La plataforma OPNET Modeler es una potente herramienta de simulación de eventos discretos que permite a los usuarios modelar y simular diversos tipos de redes de comunicación y sistemas de información. Dispone de una enorme biblioteca de modelos que contiene modelos completos para dispositivos, protocolos e implementaciones específicas de proveedores que facilitan el proceso de diseño y simulación de los escenarios del mundo real de los modelos de red modelos.

OPNET Modeler es un entorno de modelado jerárquico que se basa en C/C++ como herramienta de programación. También cuenta con una avanzada interfaz gráfica de usuario (GUI) que se utiliza para la configuración completa de diferentes redes de comunicación y de análisis de análisis. Consta de varios editores jerárquicos como el editor de proyectos, el editor de nodos editor de procesos y editor de código fuente, como se muestra en la figura 3.1



**Figura 3. 3: Estructura del entorno de simulación Opnet Modeler.**

Fuente:

La jerarquía de un módulo OPNET está separada lógicamente en tres etapas, donde se establecen los atributos para los dispositivos individuales, la etapa de Modelo de Nodo que representa las capas y la pila de protocolos, la etapa de Modelo de Proceso para la funcionalidad real de cada protocolo (estados), y la etapa de Código Fuente C/C++

para expresar las tareas de procesamiento realizadas antes, durante y después de los estados.

### 3.6. Implementación de simulación de LTE

En esta sección se implementa el modelado de LTE según especificación Release 8 utilizando la herramienta de simulación Opnet Modeler. La figura 3.4 muestra el entorno de simulación de la implementación de la red LTE. Se observa los módulos configuración de parámetros de LTE, aplicación, atributos, y calidad de servicio (QoS).

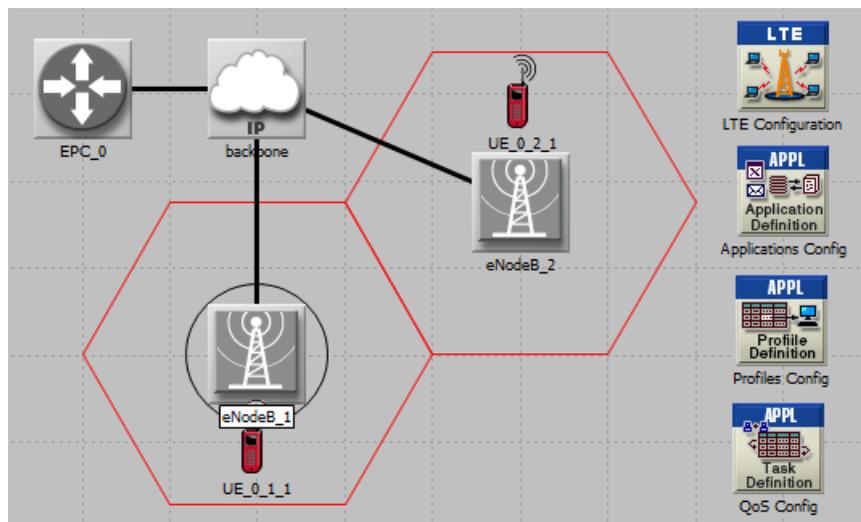


Figura 3. 4: Implementación del modelo de red LTE.  
Elaborado por: Autor.

Los módulos de configuración de parámetros LTE y atributos se utilizan conjuntamente para definir y generar el tráfico. El módulo de configuración de aplicaciones es utilizado para especificar los diferentes parámetros de las distintas aplicaciones como voz, vídeo, FTP y HTTP. Dentro de la configuración de atributos se establece la hora de inicio y finalización de cada aplicación, así como su repetibilidad. El eNodeB representa la estación base, mientras que el EPC representa las entidades S-GW, P-GW y MME. Los dispositivos móviles o equipos de usuario son representados por UEs (por ejemplo, UE\_0\_1\_1).

### 3.7. Diseño del escenario de simulación QoS en la red LTE propuesta.

Cuando las redes de paquetes IP funcionan con carga máxima (sin sobrecarga), hay recursos suficientes para todos los usuarios y los paquetes no se caen (no esperan). Por lo tanto, se evaluará la QoS en condiciones de congestión (carga > 95%) para evaluar

el rendimiento de la QoS en LTE y red core, debido a la diferencia en la capacidad de cada enlace. En las redes del mundo real, la capacidad del canal de radio del eNodeB difiere de la capacidad del enlace que conecta el eNodeB con el EPC. Además, los enlaces que conectan los eNodeB con EPC también pueden diferir entre sí.

### **3.7.1. Escenario del identificador de clase QoS (QCI)**

La QoS en LTE se realiza introduciendo el QCI que divide los paquetes en clases basadas en la prioridad y asociando el QCI con la plantilla de flujo de tráfico (TFT), donde se asocia una TFT a cada portador EPS. La TFT define un conjunto de parámetros para el reenvío de tráfico a través de todos los nodos entre el origen y el destino. Para los diferentes tráficos clasificados por QCI, se asignan diferentes TFT que pueden garantizar el ancho de banda deseado. Esto significa que los diferentes flujos de tráfico se asignan a diferentes portadores que están configurados para proporcionar diferentes niveles de QoS.

Los portadores se clasifican en: por defecto y dedicados. El portador por defecto proporciona al UE una conexión básica con el eNodeB. Los portadores dedicados se utilizan para servicios específicos y se establecen en función del perfil de suscripción del usuario. Los portadores de radio dedicados se dividen en GBR y no-GBR. Los portadores GBR garantizan un transporte mínimo de la tasa de bits especificada en el portador EPS con retardos pequeños. Los portadores no GBR son atendidos mediante un esquema de programación equitativo, en el que los recursos restantes se reparten por igual entre los portadores con datos cuando tienen el mismo QCI.

### **3.7.2. Escenario del servicio diferenciado en LTE.**

Para cada portador en la red LTE, hay un portador S1 correspondiente en la red Core. Este portador S1 utiliza el protocolo de túnel GPRS (GTP) como portador. En el modelo actual de LTE en el simulador OPNET, el proceso de encapsulación GTP no se implementa de acuerdo con el tipo de QoS de los portadores. Los paquetes que entran en el eNodeB en los paquetes que entran en el eNodeB en el enlace upstream se tunelizan y encapsulan en un paquete IP sin ninguna clasificación basada en el tipo de portador y el campo DSCP (punto de código de servicios diferenciados) se asigna al BE (máximo esfuerzo) por defecto en las cabeceras interna y externa del paquete.

El mismo problema existe en el enlace downstream cuando los paquetes que entran en el EPC se tunelizan y encapsulan sin una clasificación adecuada. Debido a este problema, cuando hay diferentes tipos de servicios como voz, FTP, HTTP, vídeo, etc., no se puede lograr una clasificación adecuada de los paquetes a nivel de IP en la red Core respetando la cabecera exterior de los túneles. Por lo tanto, los nodos de la red Core entre eNodeB y EPC no son conscientes de la clasificación basada en portadores. El tipo de estrategias de programación utilizadas en la red Core tampoco tiene sentido, por lo que todos los paquetes se clasifican con la misma prioridad. Por lo tanto, es necesario modificar los modelos de proceso de eNodeB y EPC.

### 3.8. Análisis de resultados de simulación de QoS en la red LTE.

La figura 3.5 muestra las 4 aplicaciones de voz y los perfiles con diferentes niveles de servicio que serán utilizados por el clasificador y el planificador para desplegar la QoS en LTE. Por ejemplo, se configuran 28 usuarios para generar tráfico de voz (carga normal), donde cada móvil de usuario en la red realizará 7 llamadas de voz que se añaden simultáneamente y se mantienen hasta el final de la simulación. Sin embargo, cuando los móviles de usuario se incrementan a 36 el eNodeB se sobrecarga (9 llamadas por móvil de usuario en la red).

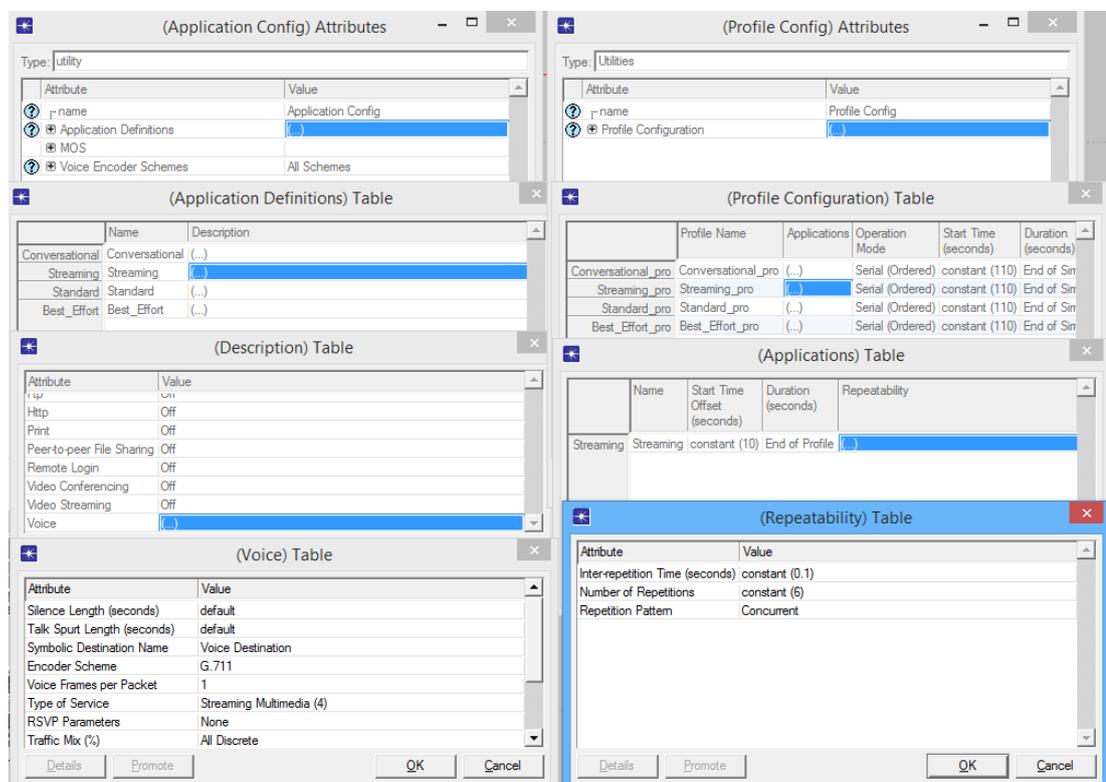


Figura 3. 5: Configuración de los parámetros de aplicaciones y perfiles para desplegar QoS.

Elaborado por: Autor.

En este escenario, en la primera configuración de prueba el eNodeB funciona con la carga normal (28 llamadas divididas entre los 4 móviles de usuario). A continuación, se aumentan las llamadas a 36 con el fin de sobrecargar el eNodeB para mostrar el impacto de la congestión en el rendimiento de la voz en la red. Las siguientes configuraciones consisten en desplegar la QoS en el radioenlace en condiciones de congestión (36 llamadas) y también para 48 y 80 llamadas.

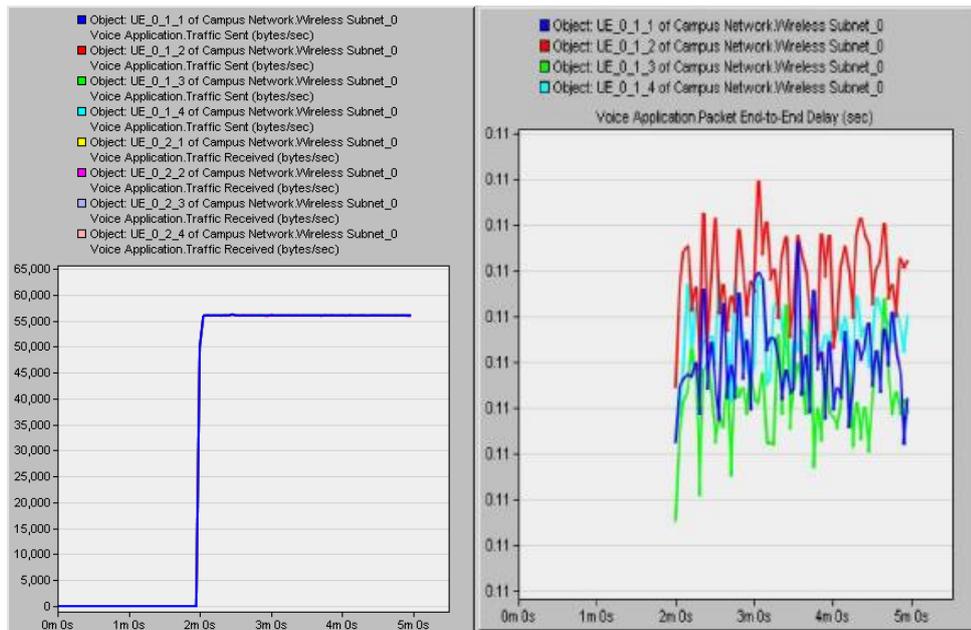
QCI es un valor escalar que se refiere a un conjunto de parámetros para determinar las características de reenvío de paquetes para estudiar la calidad del servicio en los radioenlaces. La tabla 3.3 muestra el mapeo entre el nombre del portador y el valor del tipo de servicio (ToS), donde los usuarios VoLTE son mapeados a los cuatro portadores diferentes, tal como se muestra en la figura 3.5.

<b>Portador</b>	<b>Tipo de servicio</b>
Platinum	Voz interactiva (6)
Gold	Streaming multimedia (4)
Silver	Estándar (2)
Bronce	Máximo esfuerzo (0)

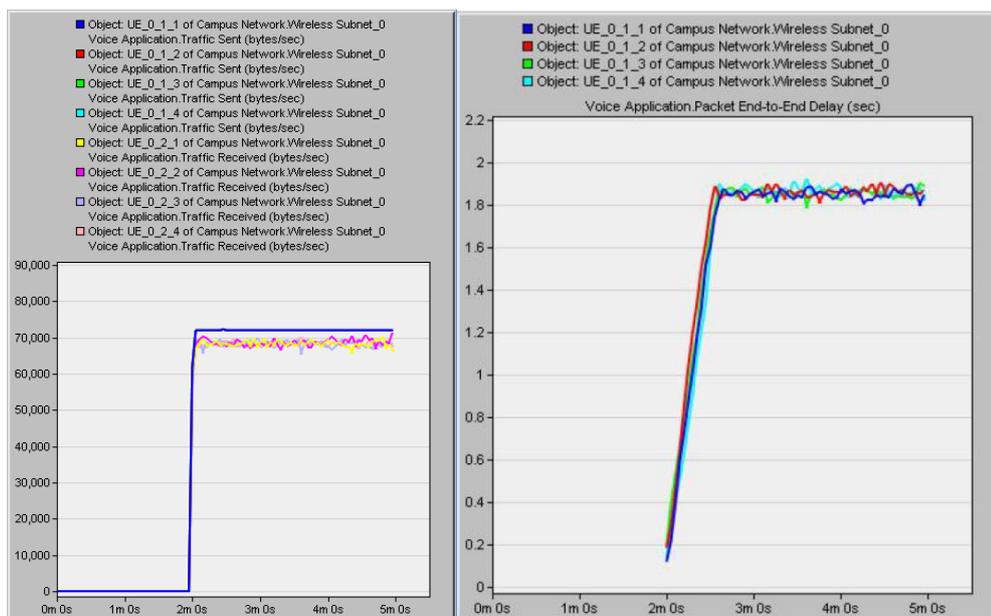
**Tabla 3. 3 Configuración de asignación de portadores EPS a ToS IP**  
Fuente: (Fortún, 2017)

La figura 3.6 muestra el rendimiento de la red cuando los eNodeBs operan en condiciones normales de carga en las que 28 usuarios llaman simultáneamente. Estas mediciones se realizan en los cuatro UEs (cada dispositivo realiza 7 llamadas). Se observa que no hay pérdida de paquetes (el tráfico recibido es igual al tráfico enviado  $7 \times 8000 = 56000$  bytes/s) y el retardo de extremo a extremo está por debajo del valor crítico ( $\sim 110 < 150$  ms).

Sin embargo, cuando el número de llamadas se incrementa a 36 (cada dispositivo realiza 9 llamadas) el rendimiento se degrada notablemente, tal como se muestra en la figura 3.7. Está claro que todos los tráficos de voz ofrecen un rendimiento inaceptable, ya que sufren pérdidas de paquetes en el lado de recepción (menos de  $9 \times 8000 = 72000$  bytes/s) y un elevado retardo de extremo a extremo que alcanza unos 1.9 segundos.



**Figura 3. 6:** Tráfico enviado/recibido y retardo extremo a extremo en condiciones normales de carga.  
Elaborado por: Autor.



**Figura 3. 7:** Tráfico enviado/recibido y retardo extremo a extremo en condiciones de congestamiento.  
Elaborado por: Autor.

Cuando se despliega la QoS (QCI) en los radioenlaces para una prueba previa, los usuarios con portador no GBR de máximo esfuerzo sólo sufren pérdida de paquetes (alrededor del 50%) y un elevado retardo (alrededor de 2.5 s) extremo a extremo, tal como se muestra en la figura 3.8. La programación en el eNodeB da prioridad en primer lugar a los usuarios con portadores GBR y, a continuación, da el ancho de banda restante a los usuarios sin portadores GBR. La programación de los portadores GBR es proporcional y equitativa, lo que garantiza un transporte mínimo de la tasa de bits

especificada en el contrato de portador EPS con retardos inferiores a los valores que se especifican en la tabla 3.4.

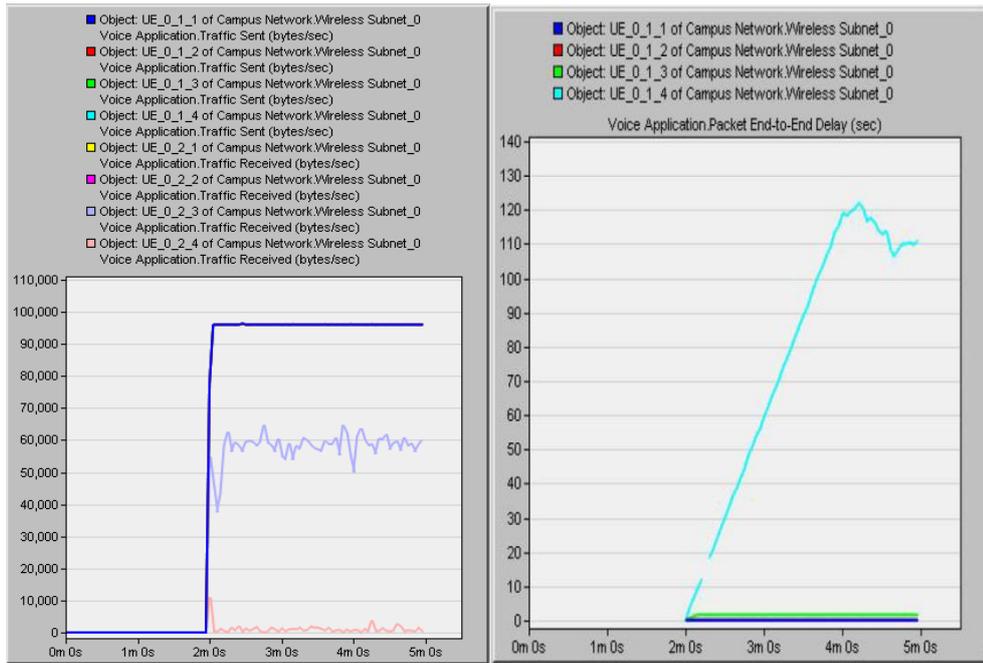
QCI	Tipo de recurso	Prioridad	Cálculo del retardo de los paquetes [ms]	Tasa de pérdida de paquetes por error	Ejemplo de servicio
1	GBR	2	100	$10^{-2}$	Comunicación por voz
2		4	150	$10^{-3}$	Comunicación por video (live streaming)
3		3	50	$10^{-3}$	Juegos en tiempo real
4		5	300	$10^{-6}$	Video sin comunicación por voz (buffered streaming)
	Non-GBR	1	100	$10^{-6}$	Señalización IMS
6		6	300	$10^{-6}$	Video (buffered streaming), TCP (www, e-mail, chat, ftp, p2p file sharing, progressive video, etc.)
7		7	100	$10^{-3}$	Voz, video (live streaming) juegos interactivos
8		8	300	$10^{-6}$	Video (buffered streaming), TCP (e.g., www, e-mail, chat, ftp, etc.)
9		9			Por defecto

Tabla 3. 4 Características estandarizadas del QCI

Fuente:

Los portadores no GBR se atienden utilizando un esquema de programación de equidad, en el que los recursos restantes se reparten por igual entre los portadores con datos cuando tienen las mismas prioridades de QCI, pero se dan más recursos para los de mayor prioridad en diferentes condiciones de QCI.

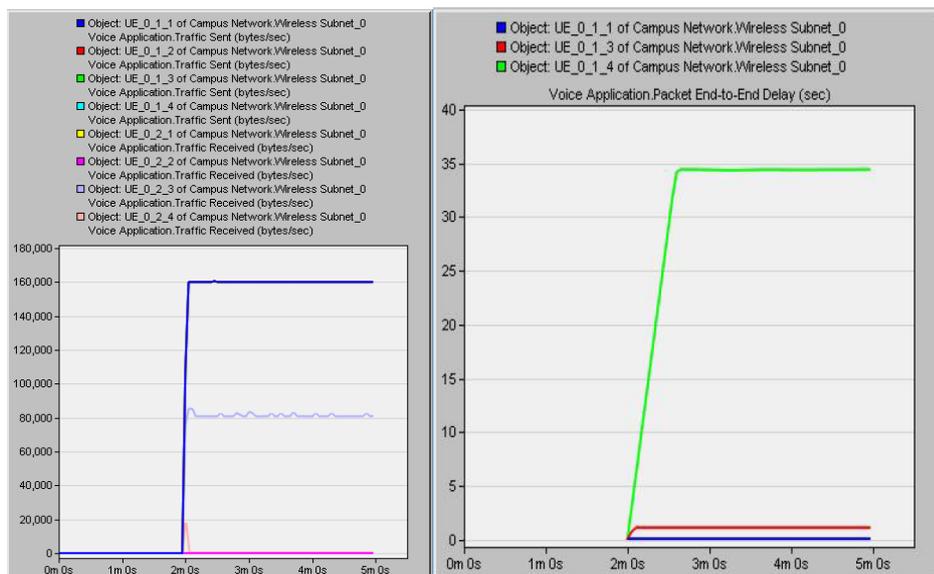
La figura 3.8 muestra el tráfico enviado/recibido y retardo extremo a extremo en condiciones de congestión para las llamadas simultáneas se incrementan a 48 (12 llamadas por UE), donde los usuarios con portador estándar no GBR se unen a los usuarios con portador de mejor esfuerzo en la pérdida de paquetes y el retardo, mientras que los otros dos portadores GBR no se enfrentan a ningún problema. El portador estándar tiene una prioridad más alta que el portador de mejor esfuerzo, por lo que los usuarios del portador estándar tienen más posibilidades de recibir datos que los usuarios del portador de mejor esfuerzo. El rendimiento del portador no GBR no es aceptable debido a la elevada pérdida de paquetes y al retardo extremo a extremo.



**Figura 3. 8: Tráfico enviado/recibido y retardo extremo a extremo en condiciones de congestionamiento con QoS.**

Elaborado por: Autor.

La figura 3.9 se muestra el tráfico y retardo en condiciones de congestionamiento con QoS, pero las llamadas simultáneas se incrementan a 80 (20 llamadas por UE), donde los usuarios con portador “dorado” son rechazados totalmente por el programado porque no hay suficiente BW dar este portador GBR. En cambio, los portadores no GBR comparten el BW restante según sus prioridades, pero siguen teniendo un rendimiento degradado. En esta prueba, sólo el portador “diamante” no se enfrenta a ningún problema porque tiene la máxima prioridad y el BW está disponible para él.

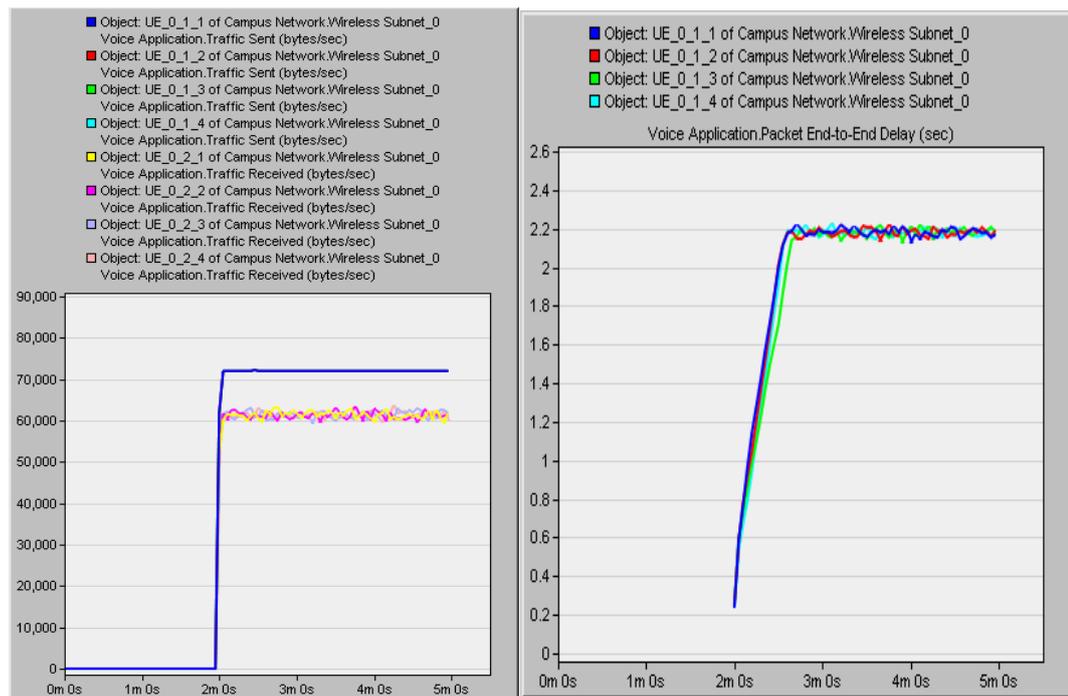


**Figura 3. 9: Tráfico enviado/recibido y retardo extremo a extremo en condiciones de congestionamiento con QoS con mayor cantidad de llamadas.**

Elaborado por: Autor.

En todos los últimos escenarios, la capacidad de los enlaces conectados a los eNodeBs con EPC se fija en valor superior a la capacidad de los radioenlaces ( $OC12 = 622,080$  Mbps) para evitar cualquier congestión en la red central. En las redes reales, la capacidad de los enlaces que conectan eNodeBs con EPC es mucho menor, y depende de la capacidad de radio del eNodeB, del tráfico en horas pico, el BW disponible en la red Core de transporte y el coste. Para estudiar la congestión en la red central, la capacidad de los enlaces se fija en un valor real considerando el tráfico de voz.

La figura 3.10 muestra el impacto de la congestión tanto en las redes de acceso radioeléctrico LTE como en las redes Core donde no se ha desplegado la QoS. Se puede observar que, el tráfico de datos de voz sufre de pérdida de paquetes y retardo extremo a extremo mayores que los valores de estos para la congestión en enlace de radio solamente, como se ilustra en la figura 3.6. Esto significa que la congestión en la red central añade retraso adicional y pérdida de paquetes.

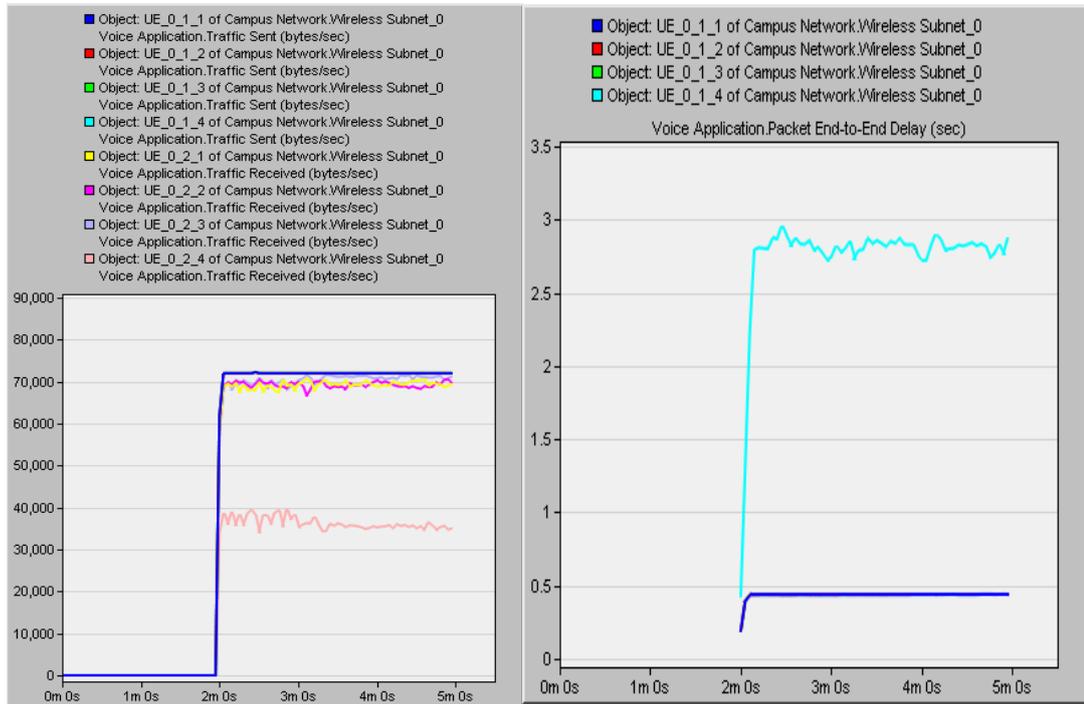


**Figura 3. 10: Tráfico enviado/recibido y retardo extremo a extremo en condiciones de congestionamiento con QoS con mayor cantidad de llamadas.**

Elaborado por: Autor.

En la siguiente configuración de prueba, la QoS (QCI) para los portadores de radio sólo se despliega adoptando los cuatro portadores Platinum, Gold, Silver y Bronce mostrados en la tabla 3.3 y como se ha realizado en la prueba anterior. En la figura 3.11 se observa que el despliegue de QCI para los portadores de radio no resulta

suficiente para usuarios de mayor prioridad y el tráfico de voz sigue sufriendo pérdida de paquetes y retardo extremo a extremo debido a la congestión de la red central.



**Figura 3. 11: Tráfico enviado/recibido y retardo extremo a extremo en condiciones de congestión con QoS con mayor cantidad de llamadas.**

Elaborado por: Autor.

Según la figura 3.12, las tres aplicaciones de voz de mayor prioridad (interactiva, streaming y estándar) obtienen un buen rendimiento después de desplegar la QoS tanto en la red LET como en la Core, donde el tráfico recibido es de 72000 bytes/s (9 llamadas × 8000 bytes/s) y el retardo extremo a extremo es de unos 115 ms. Mientras que la aplicación de voz de máximo esfuerzo sólo sufre la pérdida de paquetes y el retardo extremo a extremo mostrando un rendimiento inaceptable, donde la pérdida de paquetes es de aproximadamente el 60% y el retardo es de unos 5.6 s. La pérdida de paquetes se determina mediante la siguiente ecuación:

$$P_{perdido} = \frac{P_{enviado} - P_{recibido}}{P_{enviado}} * 100\%$$

## Conclusiones

- La razón principal detrás del cambio del mundo a la tecnología LTE es satisfacer un número creciente de necesidades de los usuarios móviles, como mayores tasas de transferencia de datos para el usuario final, menor latencia para servicios en tiempo real con menor costo de operación. En comparación con las redes anteriores, LTE se presenta como una interfaz de radio flexible para proporcionar interoperabilidad de redes heterogéneas, uso de ancho de banda flexible y soporte de servicios basados en IP de extremo a extremo.
- La voz puede no tener un mal rendimiento cuando la red LTE no está sobrecargada. Sin embargo, la voz sufre pérdida de paquetes y un retardo inaceptable de extremo a extremo cuando la red está congestionada.
- Cuando la red está congestionada, los mecanismos de QoS se utilizan para establecer diferentes pesos (prioridades) para los distintos tráficos en la red LTE utilizando QCI para los portadores de radio y servicios diferenciado en el Core, mostrando que el tráfico de voz con mayor prioridad puede mantener un retardo y una pérdida tolerables.

## **Recomendaciones**

Para el trabajo futuro, los escenarios y el entorno de simulación se pueden ampliar para admitir dinámicas de red más realistas (por ejemplo, múltiples estaciones base, escenarios de tráfico realistas que incluyen más clases de tráfico). Para agregar, se presentarán usuarios con varios patrones de movilidad. Además, el algoritmo propuesto se puede ampliar para que se ejecute de forma autónoma sin humanos en el bucle al recibir ciertos resultados de rendimiento (por ejemplo, retraso, pérdida de paquetes, etc.) como retroalimentación de los terminales de forma instantánea.

## Referencias Bibliográficas

- 3GPP, E. (2016). 3GPP TS 36.300 version 13.2.0 Release 13: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description. ETSI. [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136300\\_136399/136300/13.02.00\\_60/ts\\_136300v130200p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136300/13.02.00_60/ts_136300v130200p.pdf)
- Abioye, A. D., Joseph, M. K., & Ferreira, H. C. (2015). Comparative Study of 3G and 4GLTE Network. *Journal of Advances in Computer Networks*, 3(3), 247-250. <https://doi.org/10.7763/JACN.2015.V3.176>
- Alcatel-Lucent. (2013). 9300 W-CDMA: UMTS OVERVIEW. Alcatel-Lucent.
- Cardona, N., Olmos, J. J., García, M., & Monserrat, J. F. (2011). 3GPP LTE: Hacia la 4G móvil (Primera). MARCOMBO S.A.
- Chen, Y., & Lagrange, X. (2014). Architecture and Protocols of EPC-LTE with relay. Institut Mines-Télécom. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00830621/document>
- Fortún, L. (2017). Calidad de servicio en redes VoLTE. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. <http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/7920/L%C3%A1zaro%20Fort%C3%BAn%20Sosa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gessner, C., Roessler, A., & Kottkamp, M. (2012). LTE Technology Introduction. ROHDE & SCHWARZ. [https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl\\_downloads/dl\\_application/application\\_notes/1ma111/1MA111\\_4E\\_LTE\\_technology\\_introduction.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma111/1MA111_4E_LTE_technology_introduction.pdf)
- Hureimi Facuse, N., & Valenzuela Cano, P. (2017). Estudio y simulacion de cobertura VoLTE mediante diseño de ILINK BUDGET para red 4G LTE de ENTEL en

Santiago [Universidad de Chile].

<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/150298/Estudio-y-simulacion-de-cobertura-VoLTE-mediante-dise%C3%B1o-de-link-budget-para-red-%204G%20LTE-de-Entel-en-Santiago.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Jaramillo, M. (2015). Implementación de red móvil con tecnología 4G LTE. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

<http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/40035/D-84890.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>

Jiménez, A., & Del Carmen de los Santos, J. (2015). Comparación de Voz sobre LTE (VoLTE) y Voz sobre IP (VoIP) mediante Wireshark. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ MATEOS. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/21270/Tesis-28-11-2015%20%28final%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Kumaravel, K. (2011). Comparative Study of 3G and 4G in Mobile Technology. International Journal of Computer Science Issues (IJCSI), 8(5), 256-263.

Lara, M., & Coral, H. (2017). QoS del Servicio de Video Llamada en una Red IMS Virtualizada [Universidad del Cauca].

<http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1589/QoS%20DEL%20SERVICIO%20DE%20VIDEO%20LLAMADA%20EN%20UNA%20RED%20IMS%20VIRTUALIZADA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Majed, N., Ragot, S., Lagrange, X., & Blanc, A. (2017). Delay and quality metrics in Voice over LTE (VoLTE) networks: An end-terminal perspective. 643-648. <https://doi.org/10.1109/ICCNC.2017.7876205>

Morales, J. (2015). Estudio de factibilidad técnica para el despliegue de servicios VoLTE nativo sobre una red basada en arquitectura IMS, caso CNT EP. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

[http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/11135/TESIS%20MAESTR%C3%8DA%20EN%20REDES%20DE%20COMUNICACIONES\\_JUAN%20MORALES\\_PUCE\\_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/11135/TESIS%20MAESTR%C3%8DA%20EN%20REDES%20DE%20COMUNICACIONES_JUAN%20MORALES_PUCE_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Penttinen, J. T. J. (2011). *The LTE/SAE Deployment Handbook* (Firts). John Wiley & Sons, Ltd.

Ricaurte Zambrano, B. E., & Delgado Arechúa, R. F. (2010). Acceso a Internet en una red UMTS. Escuela Superior Politécnica del Litoral. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/11186/1/ACCESO%20A%20INTERNET%20EN%20UNA%20RED%20UMTS.pdf>

Sukar, M. A. N., & Pal, M. (2014). SC-FDMA & OFDMA in LTE physical layer. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 12(2), 12.

Teletopix. (2016). ¿Qué Es EPS Bearer en LTE? [Guía técnica]. Teletopix. <http://www.teletopix.org/4g-lte/what-is-eps-bearer-in-lte/>

UIT-T. (2008). UIT-T E.800. UIT-T. [file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/T-REC-E.800-200809-I!!PDF-S%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/T-REC-E.800-200809-I!!PDF-S%20(2).pdf)

Vaser, M., & Forconi, S. (2015). QoS KPI and QoE KQI Relationship for LTE Video Streaming and VoLTE Services. 318-323. <https://doi.org/10.1109/NGMAST.2015.34>

Vaser, M., & Maggiore, G. (2019). Improved VoLTE QoE Estimation Procedure using Network Performance Metrics. *IEEE*, 361-365.

Vizzarri, A. (2016). Quality of experience estimation for VoLTE services. 131-136. <https://doi.org/10.1109/ICFSP.2016.7802970>

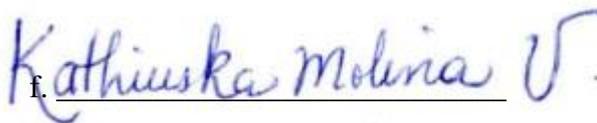
## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Kathiuska Alexandra Molina Villalta**, con C.C: # **0924554785** autor/a del trabajo de titulación: **Análisis de desempeño del servicio de voz sobre redes LTE (VoLTE) mediante el uso de indicadores claves de rendimiento (KPI)**, 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



Nombre: Kathiuska Alexandra Molina Villalta

C.C: 0924554785

<b>REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA</b>		
<b>FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN</b>		
<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	<b>Análisis de desempeño del servicio de voz sobre redes LTE (VoLTE) mediante el uso de indicadores claves de rendimiento (KPI)</b>	
<b>AUTOR(ES)</b>	Kathiuska Alexandra Molina Villalta	
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	MSc. Cordova Rivedeneira Luis; MSc. Quezada Calle Edgar / MSc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando	
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil	
<b>FACULTAD:</b>	Sistema de Posgrado	
<b>CARRERA:</b>	Maestría en Telecomunicaciones	
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Magister en Telecomunicaciones	
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	Guayaquil, 3 de diciembre del 2021	<b>No. DE PÁGINAS:</b> 85
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Estructura de red de datos LTE, Interfaces lógicas y protocolos de la arquitectura LTE, VoLTE, QoS y QoE.	
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Redes, Arquitectura, Radio, Voz, LTE, 3GPP	
<b>RESUMEN/ABSTRACT:</b> El uso generalizado de dispositivos móviles inteligentes en los últimos tiempos ha revelado la necesidad de altas velocidades de datos en las comunicaciones móviles. Para satisfacer esta necesidad, se desarrolló la tecnología Evolución a Largo Plazo (LTE), una de las tecnologías de comunicación de cuarta generación y para permitir la comunicación móvil celular con un mayor rendimiento. En comparación con los sistemas celulares anteriores, la arquitectura de red de radio de LTE está diseñada para simplificar las operaciones, reducir los costos y permitir la comunicación celular a velocidades más altas y eficiencia espectral. Gracias a las altas capacidades, alta velocidad de datos, alta eficiencia espectral y baja latencia que ofrece LTE, que se define como una interfaz de radio flexible por 3GPP; la convergencia digital se logra llevando el tráfico de voz, video y datos de un extremo a otro con paquetes IP. Por lo tanto, en el presente documento del trabajo de titulación se propone el “Análisis de desempeño del servicio de voz sobre redes LTE (VoLTE) mediante el uso de indicadores claves de rendimiento (KPI)”.		
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> 0962037872	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:katiuska.molina@gmail.com">katiuska.molina@gmail.com</a>
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):::</b>	<b>Nombre:</b> Manuel de Jesús Romero Paz	
	<b>Teléfono:</b> +593-994606932	
	<b>E-mail:</b> manuel.romero@cu.ucsg.edu.ec	
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>		
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>		
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>		
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>		