

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“EVALUACIÓN DE MÉTODOS PARA REALIZAR
MEDICIONES DE CALIDAD DE SERVICIO VOIP EN
REDES MÓVILES DE CUARTA GENERACIÓN (LTE) EN
AMBIENTES URBANOS DE LA CIUDAD DE
GUAYAQUIL”**

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del título de:

MAGISTER EN TELECOMUNICACIONES

WILLIAM GABRIEL RENDÓN ALAVA

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2017

AGRADECIMIENTO

A Dios, por permitir que alcance una más de mis metas, y darme la fortaleza necesaria y su eterna guía para alcanzar todo lo que me propongo.

A mi madre, **Belkis Alava Giler**, por todo su amor, confianza, apoyo y constante sacrificio por darme lo mejor, y lograr hacer de mí una buena persona y profesional.

A mi Director de tesis, **Ph. D. Álvaro Suárez Sarmiento**, por su excelente asesoría y valiosos conocimientos en el desarrollo de esta tesis, que me permitieron culminarla con éxito.

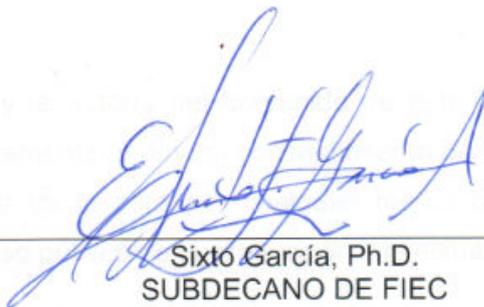
Y un agradecimiento especial a mi novia, **Georgina Sánchez Solórzano**, por estar conmigo en los momentos más importantes de mi vida, brindándome siempre su apoyo y amor incondicional.

DEDICATORIA

Dedicado a mi Madre, **Belkis Álava Giler**.

Por su amor, dedicación y su gran esfuerzo.

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN



Sixto García, Ph.D.
SUBDECANO DE FIEC



Álvaro Suárez S., Ph.D.
DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN



Gabriel Astudillo B., Ph.D.
MIEMBRO PRINCIPAL DEL TRIBUNAL

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me corresponde exclusivamente; y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).



Ing. William Gabriel Rendón Alava

RESUMEN

Este trabajo propone métodos y los analiza de manera práctica, con el objetivo de verificar la calidad de la *Voz sobre Internet Protocol (VoIP)*, con los resultados obtenidos se realiza un análisis de los parámetros necesarios de cobertura y calidad de una red celular *Long Term Evolution (LTE)*, para poder establecer una comunicación de VoIP. Además, se identifica y estudia los problemas más comunes que se presentan en este tipo de comunicación, de forma que este trabajo sea usado como una guía práctica para estudios técnicos de empresas telefónicas u organismos de control, que necesiten establecer protocolos de medición de calidad.

En resumen, este documento detalla el problema de la calidad de VoIP y justifica la investigación debido a la falta de estudios concluyentes sobre este tema.

Se incluyen los diseños de los métodos a evaluar y el procedimiento para la implementación del método seleccionado para esta investigación.

Finalmente se realiza un análisis de los resultados obtenidos durante la evaluación del método seleccionado, luego de lo cual se obtienen las conclusiones en base a los objetivos planteados.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	I
DEDICATORIA	II
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN	III
DECLARACIÓN EXPRESA	IV
RESUMEN	V
ÍNDICE GENERAL.....	VI
CAPÍTULO 1.....	1
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	1
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Justificación de la investigación	3
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo General	4
1.3.2. Objetivos Específicos.....	4
1.4. Alcance.....	5
1.5. Limitaciones.....	7
1.6. Metodología de la investigación.....	7
1.6.1. Tipo de investigación	8
1.6.2. Enfoque	8
1.6.3. Técnica	8
1.6.4. Modalidad de Recopilación de Información.....	8
1.7. Resultados Esperados.....	9
1.8. Elementos diferenciadores e innovadores	9
CAPÍTULO 2.....	12
2. CARACTERÍSTICAS DE ZONA A EVALUAR E INTRODUCCIÓN A LAS TECNOLOGÍAS LTE Y VOIP.....	12
2.1. Características de entorno urbano de la ciudad de Guayaquil	12
2.1.1. Definición de zonas a evaluar	14

2.1.2.	Evaluación de zona plana	15
2.1.3.	Evaluación de zona alta de Geografía Irregular	16
2.2.	Generalidades de la red LTE	17
2.2.1.	Características de la red LTE	18
2.2.2.	Parámetros de Radio de la red LTE	38
2.3.	Arquitectura de una red 4G LTE	50
2.3.1.	Flujo de llamada de datos de una Red LTE.....	51
2.3.2.	Relación entre flujo de llamada de VoIP y flujo de llamada en una Red LTE	55
2.4.	Generalidades de un sistema de VoIP	57
2.4.1.	VoIP	57
2.4.2.	Calidad de Servicio en VoIP	59
2.4.3.	Experiencia de usuario en VoIP	60
2.4.4.	Principales afectaciones en VoIP	62
2.5.	Arquitectura de un sistema de VoIP	66
2.5.1.	Flujo de una llamada de VoIP	70
2.5.2.	Codecs de VoIP	71
2.6.	Limitaciones de LTE para VoIP.....	74
CAPÍTULO 3.....		76
3.	MODELO PROPUESTO Y DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	76
3.1.	Modelo propuesto para la solución del problema	76
3.1.1.	Diagrama esquemático del modelo de pruebas	77
3.1.2.	Descripción detallada del modelo a utilizar.....	78
3.2.	Implementación de una central telefónica de VoIP	82
3.2.1.	Instalación de servidor CENTOS.....	82
3.2.2.	Instalación de Asterisk	83
3.2.3.	Implementación de servicios de VoIP con salida a Internet.....	87
3.2.4.	Instalación de cliente de VoIP en teléfono móvil que soporta 4G .	89
3.2.5.	Evaluación de servicio VoIP.....	92
3.3.	Diseño de experimentos	92
3.3.1.	Herramientas a utilizar	93
3.3.2.	Software a utilizar.....	93

3.3.3.	Diagrama de conexiones.....	94
3.3.4.	Diseño de Experimentos	95
3.3.5.	Evaluación de resultados	96
3.4.	Captura de datos de la red LTE mediante dispositivo móvil.....	96
3.4.1.	Configuración de equipos para captura de datos	97
3.4.2.	Crear caminos y mapas de recorridos para recolección de datos	99
3.5.	Métricas	100
3.5.1.	Métricas en LTE	100
3.5.2.	Métricas en VoIP	110
3.6.	Ejecución de Experimento	114
3.6.1.	Frecuencia de recolección de datos	115
3.6.2.	Tipos de llamada VoIP a realizar.....	116
3.6.3.	Captura de paquetes en el Servidor usando Wireshark.....	116
CAPÍTULO 4.....		118
4.	ANÁLISIS Y RESULTADOS	118
4.1.	Definición del análisis de resultados	118
4.1.1.	Especificación de escenarios de estudio.....	118
4.1.2.	Limitaciones del análisis.....	126
4.2.	Estudio de correlaciones.....	127
4.2.1.	Análisis de Cobertura vs. QoS	128
4.2.2.	Análisis de calidad de señal vs. QoS.....	150
4.2.3.	Análisis de Throughput vs. QoS	152
4.3.	Estudio de QoS.....	154
4.3.1.	Análisis de flujo y pérdida de paquetes IP vs. Cobertura LTE	154
4.3.2.	Análisis de QoS de LTE en función de QoE de VoIP	156
4.3.3.	Análisis de pérdida de paquetes en función de cobertura	156
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		159
BIBLIOGRAFÍA		164
ANEXOS.....		168
A.	ABREVIATURAS	168
B.	CÓDIGOS COMUNES DE RESPUESTA SIP.....	173

C. FOTOS DE DESARROLLO DEL PROYECTO	175
D. EJEMPLOS DE PAQUETES CAPTURADOS.....	176

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. RESUMEN DE ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN	6
TABLA 2. BANDAS DE OPERACIÓN LTE, DE 1 A 20	29
TABLA 3. BANDAS DE OPERACIÓN LTE, DE 21 A 44	30
TABLA 4. ASIGNACIÓN DE BANDAS LTE EN ECUADOR.....	31
TABLA 5. CQI, MODULACIÓN, CODING RATE Y BITS/RE.....	44
TABLA 6. CARACTERÍSTICAS DE HARDWARE SERVIDOR VOIP	78
TABLA 7. CARACTERÍSTICAS DE HARDWARE UNIDAD DE ALMACENAMIENTO DE S.O.....	79
TABLA 8. CARACTERÍSTICAS DEL DISPOSITIVO MÓVIL	81
TABLA 9. CARACTERÍSTICAS DE HARDWARE COMPUTADOR PORTÁTIL	81
TABLA 10. COMPARATIVA DE THROUGHPUT OBTENIDOS	110
TABLA 11. RESUMEN RSRP ZONA 2	134
TABLA 12. RESUMEN FLUJO DE PAQUETES.....	135
TABLA 13. RESUMEN DE EVENTOS ZONA 2	137
TABLA 14. RESUMEN DE PUNTOS DE ANÁLISIS JITTER ZONA 2.....	139
TABLA 15. RESUMEN RSRP ZONA 3	142
TABLA 16. RESUMEN DE EVENTOS ZONA 3	145
TABLA 17. RESUMEN DE PUNTOS DE ANÁLISIS JITTER ZONA 3.....	146

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. ZONIFICACIÓN DE CIUDAD DE GUAYAQUIL	13
FIGURA 2.2. ZONA CENTRO, ALTA DENSIDAD DE EDIFICACIONES.....	13
FIGURA 2.3. ZONA URBANA RESIDENCIAL DE GUAYAQUIL	15
FIGURA 2.4. VÍA GUAYAQUIL – LA PUNTILLA – DURÁN (SALIDA DE LA CIUDAD)	15
FIGURA 2.5. CERRO DEL CARMEN – CERRO SANTA ANA	16
FIGURA 2.6. PERFIL DE ELEVACIÓN GOOGLE EARTH.....	17
FIGURA 2.7. ARQUITECTURA DE REDES MÓVILES GRAN UTRAN E-UTRAN ...	20
FIGURA 2.8. ARQUITECTURA DE RED LTE.....	20
FIGURA 2.9. DIAGRAMA LÓGICO DE EPC.....	24
FIGURA 2.10. LAS PORTADORAS RF EN LTE PUEDEN DESARROLLARSE EN DIFERENTES ANCHOS DE BANDA.....	24
FIGURA 2.11. FDD: DUPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA	26
FIGURA 2.12. TDD: DUPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE TIEMPO.....	27
FIGURA 2.13. H-FDD: ASIGNACIÓN EN TIEMPO DE CANALES DE FRECUENCIA	28
FIGURA 2.14. ASIGNACIÓN DE CANALES EN 700MHZ, AWS 1700/2100 MHZ, 2.5 GHZ	31
FIGURA 2.15. SEÑAL OFDM REPRESENTADA EN FRECUENCIA Y TIEMPO	33
FIGURA 2.16. ASIGNACIÓN DE SUBPORTADORAS EN OFDM Y OFDMA.....	34
FIGURA 2.17. COMPARACIÓN ENTRE OFDMA Y SC-FDMA TRANSMITIENDO SECUENCIA DE SÍMBOLOS QPSK.....	35
FIGURA 2.18. MODELO SIMPLE DE GENERADOR Y RECEPTOR DE SEÑAL OFDMA Y SC-FDMA	35
FIGURA 2.19. SLOT EN LTE, ESTRUCTURA DE ELEMENTOS DE RECURSOS Y BLOQUES DE RECURSOS	36
FIGURA 2.20. PROGRAMACIÓN DE USUARIOS O USER SCHEDULING	36
FIGURA 2.21. ESTADOS RRC LTE Y SU RELACIÓN CON OTRAS RAT	39
FIGURA 2.22. MAPEO REPORTE DE MEDICIÓN RRC VS. RSRP EN DBM	40
FIGURA 2.23. MAPEO REPORTE DE MEDICIÓN RRC VS. RSRQ EN DB.....	41

FIGURA 2.24. ILUSTRACIÓN DEL CQI EN SUB BANDAS Y LA MEJOR BANDA M43	
FIGURA 2.25. EFECTO CERCA-LEJOS EN ENLACE DE SUBIDA EN COMPARACIÓN CON ENLACE DE BAJADA	45
FIGURA 2.26. CONFIGURACIÓN DE PUERTOS DE ANTENA/REFERENCE SIGNAL.....	47
FIGURA 2.27. HANDOVER INTER ENB SOBRE INTERFAZ X2.....	48
FIGURA 2.28. HANDOVER INTER ENB SOBRE INTERFAZ X2 – FLUJO DE MENSAJES.....	49
FIGURA 2.29. ARQUITECTURA DEL SISTEMA E-UTRAN.....	51
FIGURA 2.30. EJEMPLO DE MENSAJE REQUERIMIENTO DE CONEXIÓN RRC .	54
FIGURA 2.31. PROCESO DE CONFIGURACIÓN RRC DURANTE ESTABLECIMIENTO DE SESIÓN.....	56
FIGURA 2.32. EJEMPLO COMUNICACIÓN SIP	57
FIGURA 2.33. ARQUITECTURA DE RED VOIP SIP	67
FIGURA 2.34. INICIO DE SESIÓN SIP.....	69
FIGURA 2.35. FLUJO DE LLAMADA SIP	71
FIGURA 2.36. CODECS AMR	73
FIGURA 2.37. ANCHO DE BANDA DE AUDIO PARA CODEC AMR	73
FIGURA 2.38. DESCRIPCIÓN DE LOS CÓDEC DE VOZ MÁS POPULARES.....	74
FIGURA 3.1. MODELO DE PRUEBAS	77
FIGURA 3.2. SISTEMA OPERATIVO Y VERSIÓN DE ASTERISK	80
FIGURA 3.3. RED VPN HAMACHI EN LINUX	81
FIGURA 3.4. ESTATUS DE DISPOSITIVOS CONECTADOS EN LA VPN	89
FIGURA 3.5. CONFIGURACIÓN DE NUEVA CUENTA SIP EN ZOIPER.....	90
FIGURA 3.6. CONFIGURACIÓN DE VPN EN DISPOSITIVO MÓVIL	91
FIGURA 3.7. PUNTOS DE CAPTURA DE INFORMACIÓN	92
FIGURA 3.8. DIAGRAMA DE CONEXIONES.....	94
FIGURA 3.9. CONFIGURACIÓN DE PUERTO USB PARA DM.....	98
FIGURA 3.10. CONFIGURACIÓN DE TECNOLOGÍA RAT	98
FIGURA 3.11. DEFINICIÓN DE POLÍGONO Y CAMINO DE EVALUACIÓN.....	100
FIGURA 3.12. POTENCIA DE SEÑAL RECIBIDA	101
FIGURA 3.13. DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA RECIBIDA	101

FIGURA 3.14. CALIDAD DE SEÑAL RECIBIDA	103
FIGURA 3.15. DISTRIBUCIÓN DE CALIDAD RECIBIDA	103
FIGURA 3.16. POTENCIA TRANSMITIDA POR MÓVIL.....	104
FIGURA 3.17. DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA TRANSMITIDA	105
EN LA FIGURA 3.19 SE INCLUYE UN GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN DE PCI POR PORCENTAJE, DEL CUAL PODEMOS CONCLUIR QUE LA CELDA CON MAYOR PORCENTAJE DE MUESTRAS TIENE EL PCI=448.	105
FIGURA 3.18. CELDA MEJOR SERVIDORA	106
FIGURA 3.19. DISTRIBUCIÓN DE CELDAS SERVIDORAS	106
FIGURA 3.20. ANCHO DE BANDA REPORTADO POR LA RED	107
FIGURA 3.21. THROUGHPUT PDCP ENLACE DESCENDENTE	108
FIGURA 3.22. THROUGHPUT PDCP ENLACE ASCENDENTE	109
FIGURA 3.23. THROUGHPUT DE CAPA FÍSICA ENLACE DESCENDENTE	109
FIGURA 3.24. EJEMPLO DE DETECCIÓN DE MALA CALIDAD DE RED - ZOIPER	111
FIGURA 3.25. EJEMPLO DE ANÁLISIS RTP STREAMS	111
FIGURA 3.26. EJEMPLO DE ANÁLISIS JITTER	112
FIGURA 3.27. EJEMPLO DE PLAYBACK STREAM.....	113
FIGURA 3.28. EJEMPLO DE WIRESHARK IO GRAPH.....	114
FIGURA 4.1. RESULTADO PRIMER MÉTODO RSRP VS PCI.....	121
FIGURA 4.2. PROGRAMACIÓN EN ASTERISK RECORD & PLAYBACK.....	122
FIGURA 4.3. REPRODUCCIÓN DE TRAZA DE VOIP EN WIRESHARK.....	124
FIGURA 4.4. PROGRAMACIÓN EN ASTERISK CONTEO	126
FIGURA 4.5. MÉTRICAS DE QOS LTE Y VOIP	129
FIGURA 4.6. LEYENDA Y RANGOS DE RSRP EN OPENSIGNAL	129
FIGURA 4.7. COBERTURA LTE, OPERADORA CNT – OPENSIGNAL – 22-NOV- 2016	130
FIGURA 4.8. COBERTURA LTE, OPERADORA MOVISTAR - OPENSIGNAL – 22- NOV-2016	131
FIGURA 4.9. COBERTURA LTE, OPERADORA CLARO - OPENSIGNAL – 22-NOV- 2016	131
FIGURA 4.10. COMPARACIÓN DE DESEMPEÑO – OPENSIGNAL.....	132

FIGURA 4.11. DEFINICIÓN DE ZONAS A EVALUAR VS RSRP	132
FIGURA 4.12. ZONA 2: RSRP MENORES A -110DBM	133
FIGURA 4.13. RSRP ZONA 2.....	134
FIGURA 4.14. IO GRAPH RSRP ZONA 2.....	135
FIGURA 4.15. FLUJO RTP VS EVENTOS ZONA 2	137
FIGURA 4.16. RTP FORWARD - REVERSE <i>JITTER</i> ZONA 2.....	137
FIGURA 4.17. RTP FORWARD - REVERSE <i>DIFFERENCE</i> ZONA 2	138
FIGURA 4.18. RTP FORWARD - REVERSE <i>DELTA</i> ZONA 2	139
FIGURA 4.19. RSRP VS JITTER ZONA 2	140
FIGURA 4.20. RSRP VS FLUJO RTP ZONA 2	140
FIGURA 4.21. ZONA 3: RSRP MENORES A -110DBM	141
FIGURA 4.22. RSRP ZONA 3.....	142
FIGURA 4.23. FLUJO RTP VS EVENTOS ZONA 3	143
FIGURA 4.24. FLUJO RTP & UDP ZONA 3.....	144
FIGURA 4.25. FLUJO SDP ZONA 3	144
FIGURA 4.26. RTP STREAMS ZONA 3	145
FIGURA 4.27. RTP STREAM ANALYSIS ZONA 3.....	146
LA FIGURA 4.29 ESTABLECE UNA CORRELACIÓN ENTRE LA COBERTURA LTE REPRESENTADA POR EL RSRP Y LOS FLUJOS RTP CALCULADOS EN LA TABLA 16.....	147
FIGURA 4.28. RSRP VS JITTER ZONA 3	147
FIGURA 4.29. RSRP VS FLUJO RTP ZONA 3	149
FIGURA 4.30. COMPARATIVA RSRP ZONA 2 VS ZONA 3	149
FIGURA 4.31. VOIP CALLS ZONA 3.....	149
FIGURA 4.32. FLUJO DE LLAMADA VOIP ZONA 3	150
FIGURA 4.33. DEFINICIÓN DE ZONAS A EVALUAR VS RSRQ.....	151
FIGURA 4.34. ZONA 2: DELIMITACIÓN RSRQ MENORES A -16 DB.....	151
FIGURA 4.35. ZONA 3: DELIMITACIÓN RSRQ MENORES A -16 DB.....	152
FIGURA 4.36. DEFINICIÓN DE ZONAS A EVALUAR VS THROUGHPUT ENLACE DESCENDENTE	153
FIGURA 4.37. ZONA 2: DELIMITACIÓN THROUGHPUT ENLACE DESCENDENTE MENOR A 128 KBPS.....	153

FIGURA 4.38. ZONA 3: DELIMITACIÓN THROUGHPUT ENLACE DESCENDENTE MENOR A 128 KBPS.....	154
FIGURA 4.39. ZONA 2, PUNTO DE INFLEXIÓN ENTRE RSRP Y PÉRDIDA DE PAQUETES.....	155
FIGURA 4.40. ZONA 3, PUNTO DE INFLEXIÓN ENTRE RSRP Y PÉRDIDA DE PAQUETES.....	155
FIGURA 4.41. LÍNEA DE TENDENCIA DE RSRP VS PACKET LOSS.....	157
FIGURA C.1. DISPOSITIVOS UTILIZADOS PARA LA CAPTURA DE DATOS EN LTE	175
FIGURA C.2. DISPOSITIVOS UTILIZADOS PARA LA CAPTURA DE DATOS EN LTE	175
FIGURA D.1. PAQUETE SDP 1/3	176
FIGURA D.2. PAQUETE SDP 2/3	177
FIGURA D.3. PAQUETE SDP 3/3	177
FIGURA D.4. PAQUETE RTP	178
FIGURA D.5. PAQUETE UDP	178

INTRODUCCIÓN

Al momento de escribir este párrafo (octubre 2016), se puede decir que ya se ha marcado un cambio en la tendencia de la telefonía celular e Internet.

Las redes de telefonía celular fueron creadas en un principio para realizar llamadas de voz, lo que ha evolucionado hasta la actualidad, donde cada vez es menos frecuente usar la red de telefonía celular en voz. Como contraparte, el uso de Internet móvil se ha incrementado y se sigue incrementando con el pasar el tiempo. Luego de la implementación de las redes *Long Term Evolution (LTE)* se ha observado el aumento de tráfico de datos.

Y como punto adicional en cuanto a voz se refiere, con el pasar del tiempo se está haciendo más frecuente el uso de aplicaciones como Skype, Facebook Messenger y WhatsApp... para realizar llamadas de desde los dispositivos celulares, teniendo como ventaja la no necesidad de tener un plan de voz contratado con las operadoras de servicios celulares, poder realizar llamadas, inclusive llamadas internacionales.

Debido a esto se decidió realizar este estudio, el cual entre sus objetivos está describir el funcionamiento de la *Voz sobre Internet Protocol (VoIP)*, y las condiciones mínimas necesarias para establecer una comunicación utilizando la última tecnología de redes de datos móviles disponibles, que para nuestro caso es LTE.

CAPÍTULO 1

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente la tendencia de implantación de los servicios básicos (telefonía y televisión) de telecomunicaciones es ir sustituyendo o integrando las antiguas redes de telecomunicación con Internet, en redes móviles la tendencia es usar *Internet Protocol (IP)* sobre LTE. Si unimos estas dos tendencias tendríamos una integración para un futuro próximo, es decir, todo el tráfico de telecomunicaciones iría sobre IP y el tráfico de redes móviles viajaría sobre la red LTE, esto implica que los servicios tradicionales que son mayormente utilizados, como los telefónicos, pasarían a ser tráfico IP sobre LTE [1].

Es deseable verificar este tipo de problemas, describir como suceden y brindar una solución práctica para los operadores, de tal forma que siempre se asegure el buen servicio para el usuario final [2].

El problema radica en el uso de este servicio en ambientes urbanos, como todo sistema inalámbrico, lo más probable es encontrar puntos en los que podría verse afectada la *Calidad del Servicio (QoS)*, todo esto debido a la naturaleza de propagación de las ondas de radio. Estos problemas provocan degradación de la QoS y de la *Calidad de experiencia de usuario (QoE)* y por tanto, abandono del uso del servicio.

Los problemas de la tecnología LTE se podrían presentar por las siguientes causas:

- *Baja cobertura*: debido a la falta de sitios o estaciones base, que brinden cobertura a ciertas zonas; la cobertura puede variar, lo que ocasionaría problemas en la comunicación.
- *Baja calidad*: existen casos en que la cobertura puede ser muy buena, sin embargo hay factores que pueden degradar la QoS, como por ejemplo interferencias externas.

- *Congestión*: puede darse el caso de que el sistema no permita establecer una comunicación debido a saturación de la red, como por ejemplo, la existencia de muchos usuarios bajo la cobertura de una celda perteneciente a un nodo determinado.

Por este motivo planteamos en principio una aproximación a la solución de este problema tan complejo, mediante la evaluación de métodos para medir la calidad de voz y la creación de una relación entre la QoS de VoIP y su dependencia con los factores de cobertura y calidad de la red LTE [3] [4].

De esta manera al identificar los principales motivos en la red LTE por los cuales la calidad de VoIP se vea afectada, brindaremos recomendaciones al operador de servicios para mejorar dichos problemas.

1.1. Antecedentes

Desde el inicio y el desarrollo de las comunicaciones móviles avanzadas, se han utilizado una amplia variedad de métodos para medir los parámetros de su rendimiento: verificar su correcto funcionamiento, su correcta configuración, aceptación del producto final... Esto es así, básicamente porque los operadores de telefonía móvil necesitan mantener un buen funcionamiento de su red y conocer sus limitantes, para mantener un continuo despliegue, captar nuevos usuarios y mejorar el servicio de los usuarios ya existentes.

Las entidades de regulación de telecomunicaciones utilizan sus propios métodos de medición, para verificar que las empresas proveedoras de servicios cumplan con lo establecido en sus contratos.

Debido a estos motivos se han desarrollado métodos de medición de la calidad de los servicios de telecomunicación, y se han analizado durante muchas décadas para lograr que describan eficazmente la calidad del servicio. Sin embargo debido a la continua evolución de la tecnología, y los nuevos servicios de Telecomunicación, los métodos de medición y análisis de parámetros de rendimiento también deben evolucionar y desarrollarse. Un

ejemplo de esto es el servicio de VoIP, que aunque lleva años desplegándose en las redes de Telecomunicación día a día surgen nuevos procedimientos y formas de medir su calidad. Por otro lado, hoy día se mantiene el creciente apogeo de las comunicaciones móviles y es precisamente la comunicación de datos en IP sobre LTE el que está marcando la pauta de crecimiento de nuevos servicios (incluido el de VoIP) en este tipo de redes.

Centrándonos en LTE se detecta que es necesario analizar el comportamiento de VoIP analizando y evaluando los métodos de medición de parámetros de rendimiento cuidadosamente. Esto es debido a que, por ejemplo, la medida de calidad de VoIP realizada por Joscowicz-Sotelo [3] no discrimina qué tipo de red de acceso y transporte se usa para establecer la conexión. Elementos importantes que deben ser tomados en cuenta.

1.2. Justificación de la investigación

Se debe resaltar que los casos a nivel mundial en los que se ha implantado LTE la voz se suele comunicar por los circuitos de la antigua *Universal Mobile Telecommunication Systems (UMTS)*, y no existen estudios concluyentes de qué ocurrirá cuando todas estas llamadas telefónicas definitivamente se deban cursar haciendo uso de IP nativo. Un ejemplo claro es el de la red LTE en Ecuador, la misma que usa el *Feature CS Fall Back* [5] para cambiar de tecnología y así poder cursar una llamada de voz.

Dado que está previsto que en un futuro cercano se haga una migración de todos los servicios de la antigua red de circuitos hacia IP, considero muy importante el estudio de métodos prácticos y eficaces para obtener información de la percepción de calidad que los usuarios móviles del servicio LTE puedan llegar a tener, al usar servicios de VoIP. Hay que recalcar que es de suma importancia evaluar QoE y la QoS, de tal manera que se pueda demostrar el correcto funcionamiento del mismo y así los usuarios finales no presenten quejas de los servicios y se gane fidelidad del usuario hacia el operador que brinda el servicio [6].

Luego de fijar un método eficaz para la recolección de datos y encontrar la relación de parámetros de red LTE versus parámetros de red IP versus QoS o QoE, recomendamos estándares para el correcto funcionamiento del servicio de VoIP, y de esta manera cumplir con los estándares de calidad.

Las soluciones que se propongan, se realizan de acuerdo a las guías de optimización que existen para las redes LTE, de ser el caso [7].

1.3. Objetivos

A continuación se detallan el objetivo general y los objetivos específicos del presente proyecto de titulación.

1.3.1. Objetivo General

Realizar un estudio práctico del desempeño del servicio de VoIP sobre una red LTE, verificar sus beneficios, encontrar sus limitantes y encontrar una relación entre parámetros de QoS de LTE versus QoE para VoIP.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Estudiar el funcionamiento de servicios de VoIP sobre LTE. A la fecha actual (2017), todas las operadoras de telefonía móvil de Ecuador (MOVISTAR, CNT y CLARO) ya brindan el servicio de LTE.
- Establecer un método efectivo para la obtención de datos y la evaluación de la QoS de VoIP sobre LTE, analizando los parámetros clave de VoIP sobre LTE.
- Realizar un modelo matemático empírico en base a la recopilación de datos experimentales y análisis estadísticos, que establezca la relación entre QoS y QoE de VoIP en LTE.
- Generar una guía básica, la misma que podría ser usada como referencia para mejorar aspectos relacionados con la red LTE y los servicios de VoIP.

- Realizar recomendaciones para futuras implementaciones de VoLTE basadas en VoIP sobre LTE.

1.4. Alcance

El alcance de este trabajo es la determinación de métodos prácticos que permitan evaluar el desempeño del servicio de VoIP sobre la red LTE, una vez definidos los métodos, se evaluarán los resultados obtenidos y se contrastaría con resultados esperados. El mapeo entre objetivo específico y alcance se detalla en la Tabla 1.

Objetivo específico	Alcance de Objetivo
Estudiar de manera práctica el funcionamiento del servicio de VoIP a través de la red LTE.	<p>En el Capítulo 3.3.4 se detallan los métodos propuestos y el Capítulo 4.1.1 se describe el método a utilizar y el proceso para lograr este objetivo. Se limita solo al estudio del comportamiento de la VoIP en LTE y queda abierta la posibilidad al estudio de VoIP en otras redes, o en la combinación de todas ellas.</p> <p>Se limita el servidor VoIP a la conexión de Internet del Hogar. Queda abierto el desarrollo del servidor de VoIP con una mejor conexión de Internet, por ejemplo un laboratorio universitario.</p> <p>Debido a la falta de disponibilidad de IP pública y salida al Internet por parte del proveedor de Internet de Casa se limitó el análisis usando Virtual Private Network (VPN), queda abierto el estudio del comportamiento de VoIP sin VPN.</p>
Establecer un método efectivo para la obtención de datos y la evaluación de la QoS de VoIP sobre	<p>En el capítulo 3, se realiza la comparación teórica de 3 métodos de evaluación y medición.</p> <p>En el Capítulo 4 se hace una comparativa de los resultados de los métodos propuestos, de los</p>

Objetivo específico	Alcance de Objetivo
LTE, analizando los parámetros clave de VoIP sobre LTE.	<p>cuales se elige el mejor de los tres para realizar evaluaciones en condiciones de mala cobertura y mala calidad de señal en LTE. Esta selección se realiza en base a criterios expuestos en el capítulo 4.1.1.</p> <p>Queda abierta la posibilidad a estudios de nuevos métodos, en base a requisitos de evaluación de red.</p>
Realizar un modelo matemático empírico en base a la recopilación de datos experimentales y análisis estadísticos, que establezca la relación entre QoS y QoE de VoIP en LTE.	En el capítulo 4.3.3 se detalla el proceso para la obtención del modelo en base a la información recolectada. Se entregan gráficas con indicadores y se calcula modelo en base a las mediciones realizadas utilizando hojas de cálculo de Excel.
Generar una guía básica, la misma que podría ser usada como referencia para mejorar aspectos relacionados con la red LTE y los servicios de VoIP.	En el capítulo 3 se incluyen todos los pasos que conforman la guía básica de cómo instalar el servidor de VoIP e instalar el cliente de VoIP en el dispositivo móvil.
Realizar recomendaciones para futuras implementaciones de VoLTE basadas en VoIP sobre LTE	En base a los resultados obtenidos en el capítulo 4, se realizan recomendaciones para la implementación de VoLTE.

Tabla 1. Resumen de alcances de la investigación

1.5. Limitaciones

Se limita el trabajo a la recopilación de información como usuario final de los servicios de telefonía LTE. No se tiene acceso a la información de red de las operadoras, se desconoce la topología de red, la cobertura, la configuración... Gracias a la información pública que puede obtenerse de los entes reguladores (Arcotel, Senatel) y a la información capturada en la mensajería del teléfono de pruebas, podemos obtener información adicional: bandas de operación, modos de operación y parámetros de cobertura y calidad...

1.6. Metodología de la investigación

Este proyecto es de carácter investigativo, el cual sigue la siguiente metodología:

- Diseñar proceso de evaluación de parámetros de LTE.
- Diseñar proceso de evaluación de parámetros IP.
- Diseñar proceso que permita evaluar condiciones de frontera, es decir evaluar los límites de cobertura LTE, límites de ancho de banda IP...
- Evaluar métodos de obtención de datos de la red LTE para luego evaluar métodos de medición de QoS de VoIP, estos métodos en principio se basan en los métodos ya existentes, como el Drive Test y el MOS en redes móviles 2G y 3G [8].
- Se establece la hipótesis que el nivel de potencia de señal recibida en el dispositivo móvil es el principal factor que afecta a la QoS de VoIP, porque condiciona la comunicación eficiente de la señalización telefónica y la comunicación de voz.
- Se realiza un desarrollo experimental debido a que se hacen pruebas de campo, midiendo parámetros con un coche que se desplaza por varias zonas de la ciudad de Guayaquil.

- Para realizar las pruebas, se planea montar un servidor de VoIP sobre Internet y usar la red LTE para que el dispositivo móvil realice una llamada de VoIP hacia el servidor, el cual va a ser monitoreado.

1.6.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación realizada para este trabajo de Tesis, consiste en seguir un modelo empírico - analítico para la medición y recolección de información. Para la evaluación de los resultados se usará un método hipotético – deductivo.

1.6.2. Enfoque

El enfoque de esta investigación es de carácter cuantitativo y cualitativo; Cuantitativo ya que se basa en la recolección de información durante las pruebas a realizarse con el objetivo de validar la hipótesis planteada [9].

Cualitativo ya que se analizan las ventajas y desventajas y el desempeño de los métodos usados para la recolección de datos.

1.6.3. Técnica

Se utilizan técnicas de análisis estadísticos y correlación de la información obtenida durante las pruebas de campo [9].

1.6.4. Modalidad de Recopilación de Información

La modalidad de recolección de datos para este trabajo es digital, mediante el uso de computadores, y software especializado en capturar mensajería de equipos telefónicos, captura de paquetes IP y captura de posicionamiento mediante *Global Positioning System* (GPS). En conclusión, este trabajo entra en el grupo de modalidad presencial y observación directa.

1.7. Resultados Esperados

1. Un estudio innovador en el tema realizando una relación de las dos principales tendencias a futuro: las redes IP y LTE.
2. Propuesta de métodos efectivos de medición de calidad de VoIP en redes LTE.
3. Recomendaciones al operador de telefonía móvil para mejorar la cobertura de su red de acuerdo a los datos que se obtenga en nuestro análisis.
4. Obtener modelos experimentales que establezcan la relación entre QoS y QoE de VoIP en LTE.
5. Publicaciones en revistas de respeto a nivel mundial debido a que no conocemos ningún estudio similar al propuesto.

1.8. Elementos diferenciadores e innovadores

Previo a la elaboración del anteproyecto, se ha realizado una evaluación de posibles trabajos, verificándolos y estudiando la bibliografía, para lo cual se tienen los siguientes puntos:

- Estudio de cuarto nivel sobre VoLTE realizado por estudiantes Gururaj y Raghavendrarao del Delft University of Technology en el 2012, el cual realiza simulaciones de la red de VoLTE, análisis de resultados con el objetivo de determinar el desempeño de la VoLTE [10].

Para este trabajo se tienen los siguientes elementos diferenciadores:

- El trabajo de tesis de Gururaj y Raghavendrarao [10] se basa en simulaciones y análisis de los resultados obtenidos en dichas simulaciones. El estudio que se propone se basa en pruebas de campo con datos reales de red, mediciones reales de red y análisis de toda esta información en campo.

- El trabajo de tesis de Gururaj y Raghavendrarao se centra en la red de transporte, mas no en las condiciones de cobertura y calidad de la red LTE en lo que el trabajo propuesto en este documento hace énfasis.
- Estudio de Bachelor degree, realizado en Helsinki Metropolia University of Applied Sciences [11]. Este trabajo de tesis describe y analiza la implementación de la VoLTE desde una perspectiva programática, enfocándose en la validación extremo a extremo de una configuración de VoLTE básica usando herramientas de prueba y validación industrial las cuales validen la funcionalidad del sistema.
 - El estudio realizado en la universidad de Helsinki se basa en la implementación de una red de VoLTE y mediante pruebas usando herramientas especializadas, busca los parámetros óptimos para su desarrollo (CODEC, anchos de banda...). El principal elemento diferenciador con este trabajo es el hecho de que se propone analizar la parte de radio, es decir cobertura, calidad de señal... en la red LTE y con esto obtener información concluyente que nos permita identificar posibles problemas de QoS.
- Estudio similar realizado en el 2010 por estudiantes de la ESPOL [8] el cual busca una relación entre las redes UMTS y los servicios de VoIP. Este trabajo tiene una serie de diferencias con nuestra propuesta:
 - El estudio realizado se basa en redes UMTS, el enfoque que se busca ahora, es fijarlo para redes de cuarta generación (LTE).
 - Los estudios anteriores realizados se basan en simulaciones y pruebas estáticas con módems, usando redes UMTS y *Global System for Mobile communications (GSM)*, con lo cual no buscan problemas en las redes UMTS/GSM mas bien, muestran el desempeño del servicio de VoIP sobre una celda UMTS/GSM. En cambio, el estudio que se propone busca hacer recorridos de verificación, de los cuales se obtendrá información de tiempo, de GPS y de parámetros de red LTE al mismo tiempo que se obtienen datos en el servidor de VoIP, con lo cual se

podría realizar un análisis más extenso, en tiempo, espacio, parametrización...

- Los estudios anteriores no evalúan métodos de medición y recolección de información de las redes, más bien se basan en los resultados obtenidos de un solo método.
- En los estudios anteriores, se hacen conclusiones en cuanto a comprobación de funcionamiento de los CODEC sobre redes LAN y redes UMTS, no se encuentran correlaciones entre QoS y parámetros de red UMTS. Mi propuesta busca crear estas relaciones para poder generar un modelo el cual pueda ser usado para asegurar la QoS de VoIP, de acuerdo a parámetros de la red LTE.

Como conclusión podemos decir que si bien existen trabajos relacionados con el tema, algunos muy similares como los citados en las referencias de este documento, como por ejemplo el trabajo de tesis sobre el estudio de VoIP en redes UMTS [8] estos no toman en cuenta todos los factores involucrados en una red móvil. Por lo tanto, el trabajo que se propone es un estudio real de las condiciones en las que se presenta el servicio.

Se observa que estamos ante un trabajo muy innovador, debido a la relación que se pretende crear y los resultados que se pretende obtener.

Para finales de 2016 en el Ecuador se han desplegado las redes LTE de las operadoras CNT, CLARO y MOVISTAR. Las pruebas se realizaron sobre la red de CNT, la misma que ya se encuentra operativa en la ciudad de Guayaquil.

CAPÍTULO 2

2. CARACTERÍSTICAS DE ZONA A EVALUAR E INTRODUCCIÓN A LAS TECNOLOGÍAS LTE Y VOIP

El capítulo 2 define la problemática de la QoS de las redes LTE para la ciudad de Guayaquil, se describen las características de esta ciudad y la definición de zonas a ser evaluadas. Luego se hace una introducción a las redes LTE y a las redes de VoIP lo cual incluye una revisión de sus generalidades, sus parámetros y la arquitectura que usan.

2.1. Características de entorno urbano de la ciudad de Guayaquil

Partiendo del hecho de que Ecuador es un país que posee una alta variedad de climas, regiones, biodiversidad..., la ciudad de Guayaquil también posee un entorno urbano diverso. El entorno urbano afecta directamente a la propagación de la señal, y más aún cuando la red actual de LTE en el Ecuador trabaja en bandas de frecuencias altas (hasta Octubre 2016, la red LTE en Ecuador ha sido desplegada en las bandas de 1900 y 2100 Mhz).

Guayaquil posee cerros, ríos, esteros, planicies, malecones, áreas verdes, zonas con alta densidad de edificaciones, zonas industriales, urbanizaciones cerradas, áreas marginales... [12]. Esta variedad de zonas, implica la existencia de una amplia variedad de entornos de propagación diferentes, cada uno afectado por las características de la zona en que se encuentre.

En la Figura 2.1 se resume las principales zonas de la ciudad de Guayaquil.

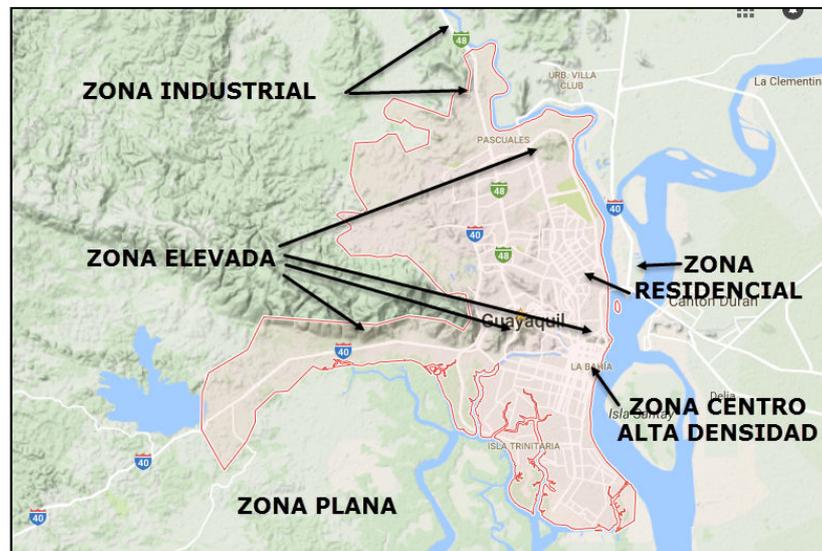


Figura 2.1. Zonificación de ciudad de Guayaquil

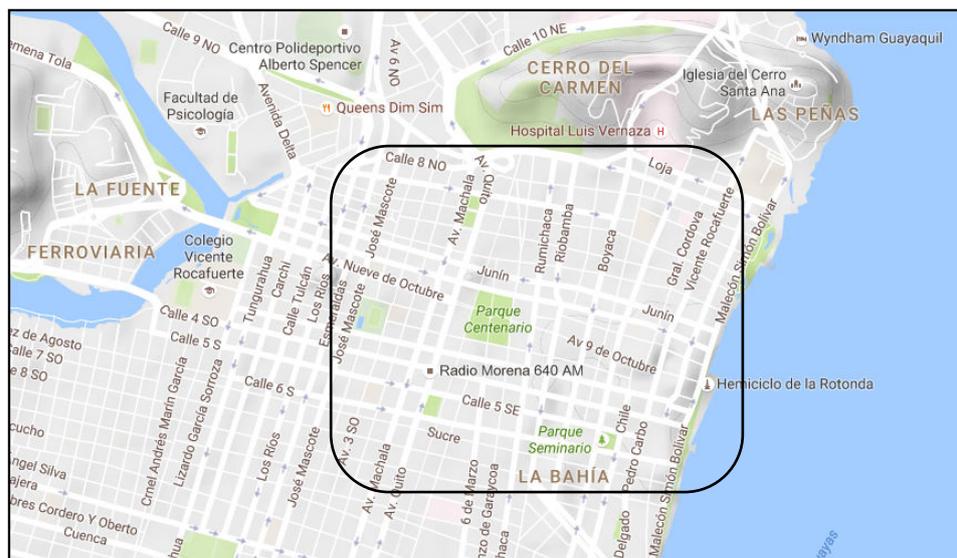


Figura 2.2. Zona Centro, Alta densidad de Edificaciones

La zona centro se convierte en una zona de alto interés, debido a la afluencia turística en lugares como el Malecón, Las Peñas, Av. 9 de Octubre y variedad de Parques. Adicionalmente existen muchos edificios altos que albergan oficinas, principalmente debido a la zona bancaria y a la zona

comercial en los alrededores. En la Figura 2.2 se muestra la zona céntrica de la ciudad de Guayaquil, la misma que posee una alta densidad de edificaciones y una gran concentración de personas y por ende de usuarios del servicio de telefonía móvil.

2.1.1. Definición de zonas a evaluar

Para este trabajo, se escogen 3 zonas bien definidas:

- Se pretende evaluar una zona urbana, en la misma se esperaría encontrar buenos niveles de cobertura y calidad, no se espera detectar problemas, se usa como base para comparar con otras zonas.
- Se requiere evaluar zonas donde se tenga una mala cobertura, por lo tanto se escogen zonas de frontera, es decir lugares alejados de la ciudad, donde se presume que la cobertura decaería. Este lugar es de geografía plana, por lo tanto el terreno no influye en la calidad de la señal recibida.
- Se requiere evaluar zonas de QoS deficiente, una opción para esto es una zona elevada, asumiendo que la red no esté optimizada se escoge la cercanía a un cerro o un lugar elevado, en el cual el dispositivo móvil esté en cobertura de varias estaciones base al mismo tiempo.

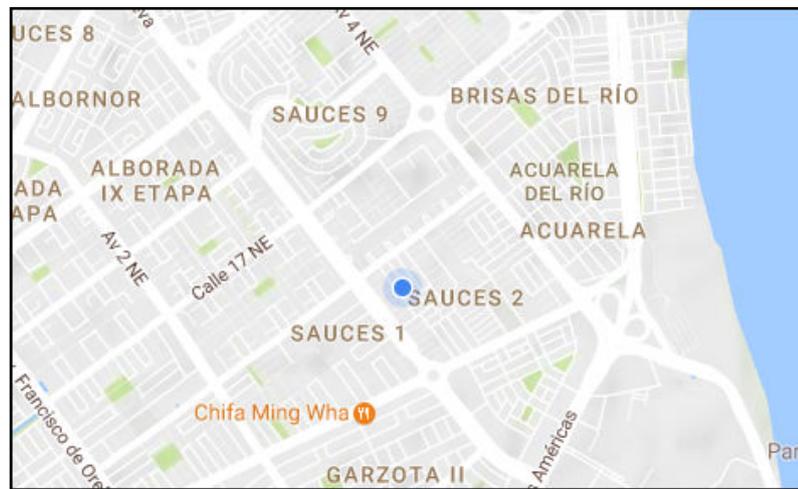


Figura 2.3. Zona Urbana Residencial de Guayaquil

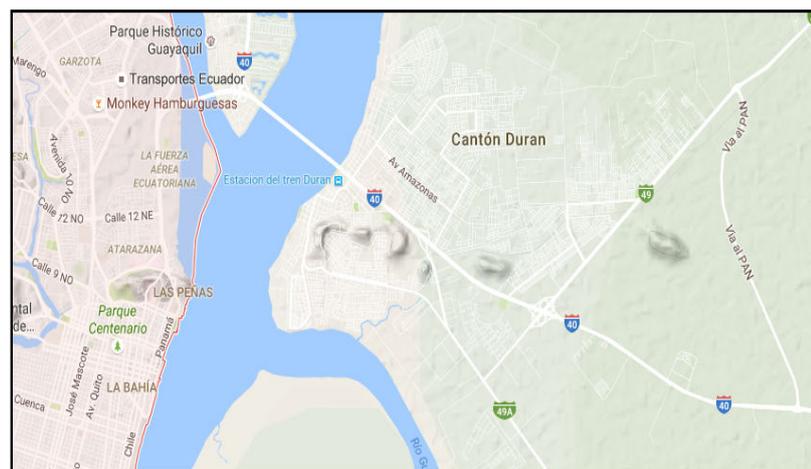


Figura 2.4. Vía Guayaquil – La Puntilla – Durán (Salida de la Ciudad)

2.1.2. Evaluación de zona plana

La ciudad de Guayaquil es mayormente plana, a excepción de las zonas cercanas a los cerros, por tanto existe gran variedad de zonas a evaluar.

La primera zona a escoger se encuentra ubicada en el norte de Guayaquil, esta se muestra en la Figura 2.3. Entre sus características podemos señalar que tiene una alta densidad de población, debido a sus conjuntos residenciales, comercios...

Para la segunda zona, partiendo del hecho de que se requiere evaluar zonas planas de baja cobertura, se escoge la carretera de salida de Guayaquil, incluyendo los puentes que unen Guayaquil, La Puntilla y Durán, esta zona es mostrada en la Figura 2.4.

2.1.3. Evaluación de zona alta de Geografía Irregular

Se selecciona la zona del Cerro del Carmen y del Cerro Santa Ana para la evaluación de terreno irregular, debido a su altura se espera que existan señales interferentes las cuales afecten la calidad de la señal, incluso en condiciones de buena cobertura, esta zona se muestra en la Figura 2.5.



Figura 2.5. Cerro del Carmen – Cerro Santa Ana

Utilizando herramientas gratuitas disponibles en Internet, en este caso Google Earth, se puede validar la altura de una zona elevada, para el caso del cerro del Carmen, utilizando la herramienta de perfil de elevación, nos muestra una altura de aproximadamente 84 metros

sobre el nivel del mar en una zona vehicular. En la Figura 2.6 se muestra el perfil de elevación de una zona vehicular del Cerro del Carmen.

2.2. Generalidades de la red LTE

En este apartado se hace referencia a conceptos básicos de LTE sin entrar a realizar un estudio profundo y detallado.

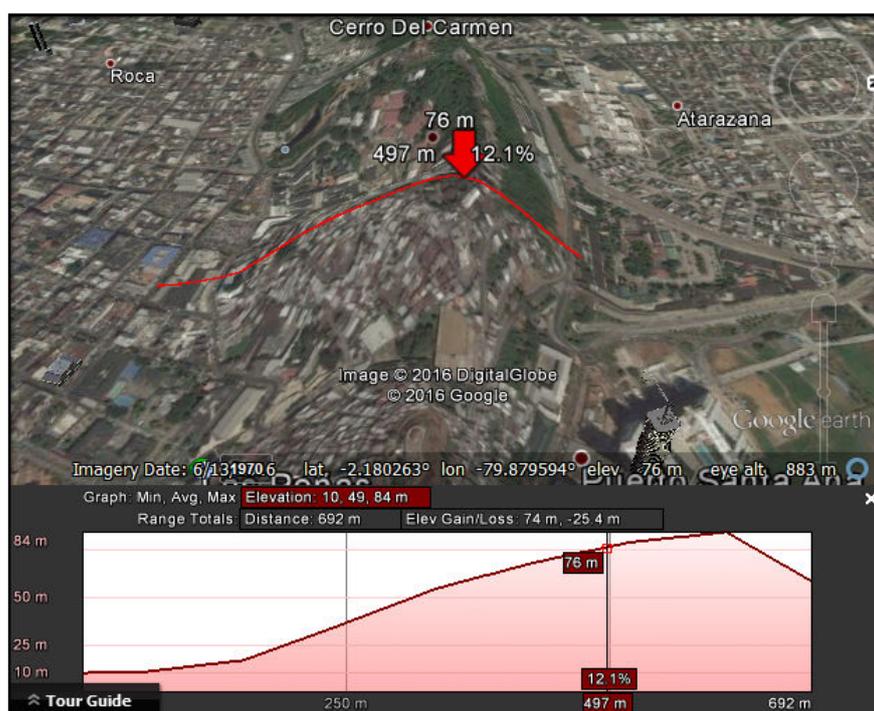


Figura 2.6. Perfil de Elevación Google Earth

LTE es un estándar para comunicación móvil de datos a alta velocidad. Fue desarrollado por el grupo *3rd Generation Partnership Project (3GPP)* [14] el cual tuvo los siguientes objetivos en su desarrollo:

- Aumentar los picos máximos de descarga y carga de datos.
- Ancho de banda escalable.
- Mejorar la eficiencia espectral.
- Usar IP en toda la red.

- Crear un estándar que soporte una multitud de tipos de usuarios diferentes.
- Reducir la brecha de intercambio de datos con redes de datos fijas [13].

2.2.1. Características de la red LTE

En Noviembre del 2004 el 3GPP identificó algunas características de la *UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)*:

- Reducir el costo por bit.
- Incrementar el aprovisionamiento de servicio – más servicios a menor costo con una mejor QoE.
- Flexibilidad de uso de las bandas de frecuencias nuevas y existentes.
- Arquitectura simplificada, interfaces abiertas.
- Permitir un consumo de energía razonable en los terminales.
- La *Evolved UTRAN (E-UTRAN)* debería aportar mejoras significativas para justificar el esfuerzo de normalización y debe evitar elementos innecesarios, dividiendo la red en dos partes topológicas claras: acceso y núcleo (*core*) para que se adapten mejor a los nuevos servicios.

A partir de las estas características deseadas, la 3GPP estableció una agenda de trabajo con el objetivo siguiente: desarrollar un marco para la evolución de la tecnología de acceso por radio 3GPP hacia una alta velocidad de datos, baja latencia y la tecnología de acceso por radio por paquetes optimizada. A partir del cual se centró el siguiente estudio:

- Relacionado a la capa física de la interfaz de radio (enlaces de subida y bajada). Ejemplo: soportar una transmisión flexible con ancho de banda mayor a 20 Mhz, con la introducción de nuevos esquemas de transmisión y tecnologías avanzadas de múltiples antenas.

- Relacionado a la interfaz de radio de nivel 2 y nivel 3. Ejemplo: optimización de señalización.
- Relacionado a la arquitectura UTRAN. Identificar la óptima arquitectura de red UTRAN y realizar una división entre la *radio access network* (RAN) y los nodos.
- Relacionado a problemas de *Radio Frecuencia (RF)*.

- **Arquitectura de red LTE**

En la Figura 2.7 se muestra la arquitectura de una red móvil en general, la cual incluye GSM, UMTS y LTE en sus capas de acceso y de core [15].

Como podemos observar, se encuentra muy bien definidas las redes de acceso: GERAN, UTRAN y E-UTRAN; además se encuentra bien definidas las redes de CORE (núcleo): *Circuit Switched Core* (CS Core), la cual maneja el tráfico de voz en GSM y UMTS; *Packet Switched Core* (PS CORE) que maneja el tráfico de datos en GSM y UMTS y la *Evolved Packet Core* (EPC) la cual maneja el tráfico de datos en LTE. En todas estas entidades se hacen interconexiones para las redes de voz *Serving Switching Point* (SSP) e Internet.

En la Figura 2.8 se muestra la arquitectura red o topología de red de una red LTE [16].

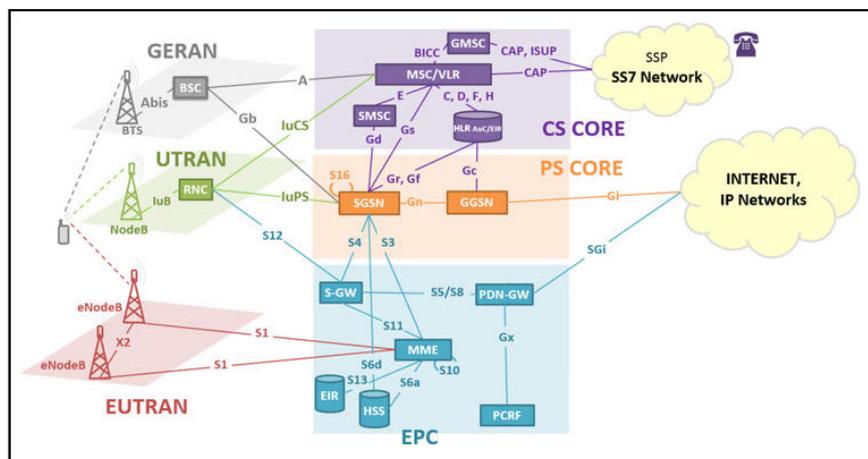


Figura 2.7. Arquitectura de redes móviles GERAN UTRAN E-UTRAN

Fuente: Telecom Hall [15]

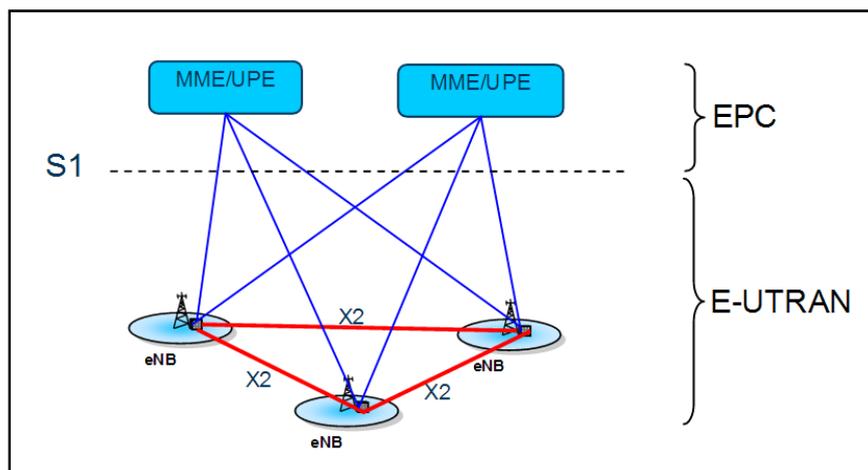


Figura 2.8. Arquitectura de red LTE

Fuente: 3GPP SAE [16]

La tecnología LTE utiliza el modelo *System Architecture Evolution* (SAE) mostrado en la Figura 2.8, el cual se basa en una estructura de red simplificada, es decir se reducen el número de elementos de la red de acceso y del core. Esta configuración permite una mejora en el desempeño, particularmente reduce la latencia de la red. Reducir el número de elementos en la red adicionalmente ayuda en

reducir el costo de inversión de los operadores en el desarrollo de su red. La interoperabilidad entre 2G, 3G y 3.5G se mantiene [17].

Destacamos los siguientes elementos principales:

1. El *evolved NodeB* (eNB): evolución del NodeB de la UTRAN; es el hardware al que el *Equipo Terminal (UE)* se conecta [18] [19] a través de la interfaz S1 a la EPC. Sus funciones son: *Radio resource management*, *Radio bearer control*, *Radio admission control*, *Connection Mobility control*, *Dynamic Resource allocation* (planificación).

2. *Mobility Management Entity (MME)*, es la entidad perteneciente al plano de control dentro de la *Evolved Packet System (EPS)* la cual desempeña la gestión de movilidad de usuario entre eNBs, también se encarga de la distribución de los mensajes de paging hacia los eNBs (paging se utiliza para localizar dispositivos), en resumen cumple las siguientes funciones [20] dentro de la unidad de gestión de movilidad:
 - Señalización y seguridad en capa *Non Access Stratum (NAS)*.
 - Señalización inter nodos Core Network (CN), para movilidad dentro de redes de acceso 3GPP.
 - Gestión de tracking área list.
 - Selección de Packet Data Network Gateway (*PDN GW*) y Serving Gateway.
 - Selección de *Serving GPRS Support Node (SGSN)* para traspaso a redes de acceso 3GPP de GSM o UMTS.
 - Roaming.
 - Autenticación.
 - Función de gestión de portadoras, incluyendo establecimiento de portadora dedicada.
 - Intercepción de tráfico de señalización ilícito.

Debido a requisito de compatibilidad con redes de acceso 3GPP2, MME soporta:

- Selección y mantenimiento de nodo de acceso *High Rate Packet Data* para CDMA (*HRPD*) para traspasos hacia tecnologías *Code Division Multiple Access* (*CDMA*).
- Transferencia transparente de mensajes de señalización HRPD y transferencia de información de estatus entre E-UTRAN y redes de acceso HRPD.
- El proceso de transferencia de información entre SGSN, el MME y el *Home Subscriber Server* (*HSS*) está definido en las especificaciones 3GPP TS 23.401 y TS 23.060.

Para la funcionalidad habilitada de CS Fallback, el MME soporta las siguientes funciones adicionales de acuerdo a especificación 3GPP TS 23.272:

- Entrega de un número *Visitor Location Register* (*VLR*) y *Local Area Identity* (*LAI*) fuera de la *Tracking Area Identity* (*TAI*).
- Mantiene una asociación de *Serving Gateway* (*SG*) hacia la *Mobile Switching Centre* (*MSC*)/*VLR*, para EPS/ *International Mobile Subscriber Identity* (*IMSI*) que haya sido asignada al dispositivo móvil (*UE*).
- Iniciador de separación de *IMSI* y separación de EPS (desconectarse)
- Iniciador de proceso de *paging* hacia los eNB cuando las MSC buscan un UE para procesos de servicios CS.
- Soporta procesamiento de *Short Message Service* (*SMS*) para CS *fallback*.
- Soporta interfaz de CS Fallback y funciones relacionadas para redes de acceso 1xRTT CDMA.

Cuando el MME es configurado para soportar interworking en 3GPP CS, el MME soporta las siguientes funciones, las cuales se especifican en TS 23.216:

- División de portadoras PS, separando las portadoras de voz PS de las portadoras no-voz PS.
 - Traspaso de portadoras PS de no-voz con las celdas destino, de acuerdo al procedimiento de traspaso Inter RAT definido en especificación en TS 23.401
 - Inicia traspasos *Single Radio Voice Call Continuity* (SRV CC) para traspasos de voz que incluyan componentes de la celda destino.
 - Coordinación de traspasos PS y SRV CC cuando los dos procedimientos son realizados.
3. *User plane entity* (UPE): los dispositivos host UPE tienen las siguientes funciones:
- Compresión de cabeceras IP y cifrado de flujo de datos de usuario...
 - Terminación de paquetes de plano de usuario debido a razones de *paging*.
 - Switcheo de plano de usuario debido a soporte de movilidad de UE.
4. *Serving Gateway* (SGW): este es un elemento de core, que encamina los datos de usuario. El SWG adicionalmente tiene la capacidad de proveer manejo de QoS usados por otras redes.
5. *Packet Data Network Gateway* (PGW): es la interfaz que interconecta las comunicaciones de datos con las redes externas. Provee filtrado de datos vía inspección profunda de paquetes, con el objetivo de manejar la gestión de

movilidad/handovers hacia redes que no pertenecen a la 3GPP, como WiMAX, CDMA...

En la Figura 2.9 se detalla el diagrama lógico de la EPC y sus elementos de red [17].

- Modos de operación

La red LTE puede ser desplegada usando varias configuraciones de canales RF como se muestra en la Figura 2.10.

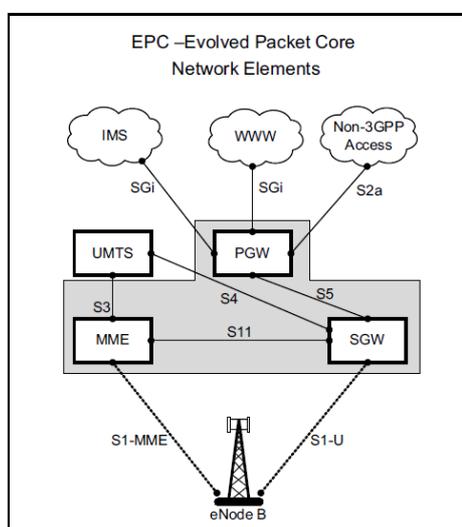


Figura 2.9. Diagrama lógico de EPC

Fuente: [17]

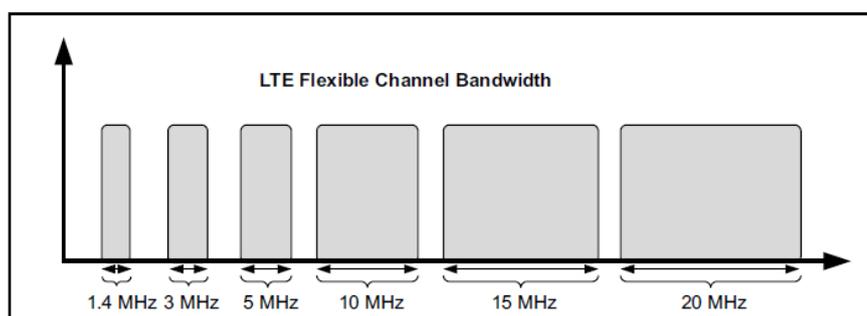


Figura 2.10. Las portadoras RF en LTE pueden desarrollarse en diferentes anchos de banda

Fuente: [17]

Por lo tanto, una operación de LTE puede tener un ancho de banda seleccionado de 5, 10, 15 y 20 MHz; anchos de banda menores de 5 MHz también son compatibles, es decir, 1,4 y 3 MHz para el modo FDD (Frequency Division Multiplex). Esto asegura que LTE puede funcionar en la mayoría de las asignaciones de espectro, es decir, en un espectro apareado para FDD (bandas de enlaces ascendente y descendente separadas) o ser implementado en un espectro no apareado con canales de 1,4 y 3 MHz utilizando TDD (Time Division Multiplexing, empleando la misma frecuencia de enlaces ascendente y descendente separadas en el tiempo).

Esto permite un alto grado de flexibilidad, y re-uso de las bandas existentes utilizadas para los sistemas 2G y 3G, e incluso permite coexistir con estas tecnologías en los espectros adyacentes [17].

En cuanto a los sentidos de transmisión, en todas las redes inalámbricas existen dos sentidos de transmisión con lo cual se forma un sistema bidireccional de comunicación inalámbrica. El primer sentido es desde estaciones base a los clientes (flujo de bajada) y el otro es desde los clientes a las estaciones base (flujo de subida). El flujo de bajada también se puede llamar de enlace descendente, aunque el último es más adecuado para la conmutación de circuitos, lo mismo se aplica al flujo de subida, que puede ser llamado como enlace ascendente [17].

Esta dirección de multiplexación es llamada *duplexing* y existen tres métodos para implementarla:

- *Frequency Division Duplexing (FDD)*: la multiplexación de los dos flujos (ascendente y descendente) usan simultáneamente dos bandas diferentes de frecuencia, una de bajada y otra de subida. Esto permite una comunicación continua en las dos bandas.

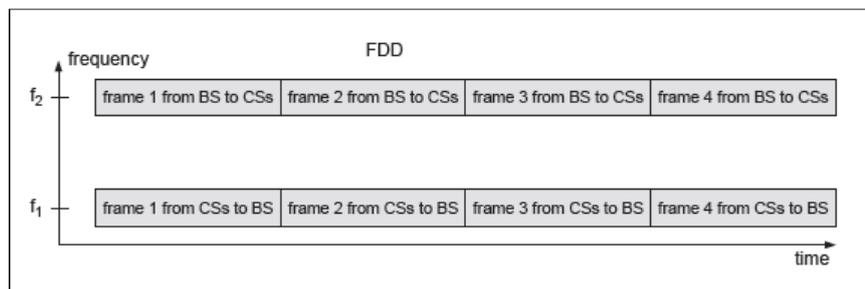


Figura 2.11. FDD: Duplexación por división de Frecuencia

Fuente: [17]

En la Figura 2.11 se ilustra la Duplexación FDD, la cual es representada por dos streams de información y cada stream tiene su propio transmisor y receptor. La diferencia entre intensidad de señal que puede existir entre transmisor y receptor es muy grande (puede llegar a ser mayor a 100 dB) y a pesar de que se encuentran en diferentes bandas, es muy difícil proteger al receptor de la señal que genera su propio transmisor. Esto solo se puede lograr si las frecuencias de enlace de subida y enlaces de bajada están suficientemente espaciadas para poder realizar filtrado o bloqueo. El espaciamiento mínimo es usualmente de 45 Mhz [17].

- *Time Division Duplexing (TDD)* se realiza en el dominio del tiempo y solamente se usa una banda de frecuencia. Este método es favorable para las comunicaciones digitales porque permite el balance de los dos flujos.

En la Figura 2.12 se ilustra la transmisión TDD, donde el eje horizontal representa el tiempo y el eje vertical la frecuencia.

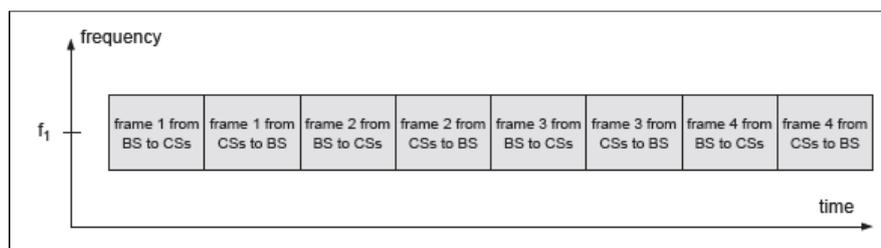


Figura 2.12. TDD: Duplexación por división de Tiempo

Fuente: [17]

En TDD se asigna transmisiones separadas en tiempo, para subida y bajada, y esto es transparente para los usuarios. El ciclo de asignación es definido por el periodo del *Frame* (La trama), el cual es dividido en dos: una subtrama de subida y una subtrama de bajada. La longitud de cada trama es un múltiplo de la duración del símbolo. Entonces las dos subtramas pueden tener diferente duración con el objetivo de acomodar el tráfico asimétrico en los enlaces de subida y bajada [17].

La relación entre la duración de subtrama de subida y la subtrama de bajada es igual a la *relación TDD* que es única para toda la red. Es decir, todos los eNB utilizan la misma relación, de subida vs bajada, esto con el objetivo de evitar interferencia. Un valor típico para la relación TDD es de 60%, sin embargo este valor debe ser ajustado por los ingenieros de diseño de red, según las especificaciones requeridas para lograr brindar óptimos servicios [17].

- En el *Half Duplex Frequency Division Duplexing (H-FDD)* ambas partes: el equipo móvil y la estación base usan diferentes frecuencias, pero no se transmite al mismo tiempo, esto supera el requisito del sistema de una gran separación de frecuencia pero solamente usa frecuencias el 50% del tiempo, asignando el 50% restante a otra celda, esta asignación se ilustra en la Figura 2.13.

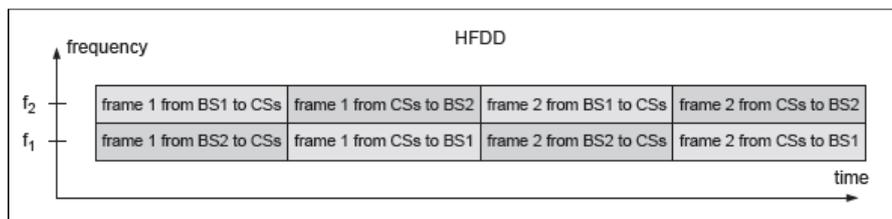


Figura 2.13. H-FDD: Asignación en tiempo de canales de frecuencia

Fuente: [17]

Tanto FDD y su variación H-FDD utilizan una duración de trama fija para las transmisiones en flujo de bajada y flujo de subida. Esto funciona bien para los servicios simétricos que requieren la misma velocidad de datos para las dos direcciones, sin embargo, no es adecuado para aplicaciones tales como la Internet, en la que los usuarios demandan tráfico asimétrico a la red, es decir, se requiere diferentes velocidades para la descarga y la carga.

A pesar de que las bandas de frecuencia asimétricas podrían ser consideradas en FDD, esto no es fácil de implementar, ya que la asignación de frecuencias ya se había hecho en el pasado con el uso de bandas simétricas. Para tales aplicaciones, el modo TDD es más eficiente, ya que ofrece la distribución de adaptación de duración de la trama para subida y bajada. Una ventaja de FDD, sin embargo, es el hecho de que los usuarios no tienen que esperar a la sub trama asignada, lo que reduce la latencia del sistema.

- Banda de operación

Una de las principales características de las redes LTE, es su flexibilidad, esto fue un punto importante de discusión durante su diseño.

La flexibilidad en las bandas de operación es un punto clave debido a que muchos países usan distintas bandas de frecuencias, según

las necesidades de cada país, y recordando que el espectro radioeléctrico es un recurso finito y muchas veces escaso, esto hace más importante el enfoque de las bandas de operación [21].

La especificación *3GPP TS 36.101 versión 12.7.0 Release 12*, hace referencia a las características mínimas de radio frecuencia requeridas para LTE.

En las Tablas 2 y 3 mostradas a continuación, se resumen todas las bandas de operación de LTE, incluidas las que se usan actualmente en las redes de Ecuador [22].

E-UTRA Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit	Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive	Duplex Mode
	$F_{UL,low} - F_{UL,high}$	$F_{DL,low} - F_{DL,high}$	
1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	FDD
3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD
4	1710 MHz – 1755 MHz	2110 MHz – 2155 MHz	FDD
5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894 MHz	FDD
6 ¹	830 MHz – 840 MHz	875 MHz – 885 MHz	FDD
7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	FDD
8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz – 1784.9 MHz	1844.9 MHz – 1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz – 1770 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz – 1447.9 MHz	1475.9 MHz – 1495.9 MHz	FDD
12	699 MHz – 716 MHz	729 MHz – 746 MHz	FDD
13	777 MHz – 787 MHz	746 MHz – 756 MHz	FDD
14	788 MHz – 798 MHz	758 MHz – 768 MHz	FDD
15	Reserved	Reserved	FDD
16	Reserved	Reserved	FDD
17	704 MHz – 716 MHz	734 MHz – 746 MHz	FDD
18	815 MHz – 830 MHz	860 MHz – 875 MHz	FDD
19	830 MHz – 845 MHz	875 MHz – 890 MHz	FDD
20	832 MHz – 862 MHz	791 MHz – 821 MHz	FDD
NOTE 1: Band 6 is not applicable			
NOTE 2: Restricted to E-UTRA operation when carrier aggregation is configured. The downlink operating band is paired with the uplink operating band (external) of the carrier aggregation configuration that is supporting the configured Pcell.			

Tabla 2. Bandas de Operación LTE, de 1 a 20

Fuente: [22]

E-UTRA Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit		Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive		Duplex Mode
	$F_{UL,low}$	$F_{UL,high}$	$F_{DL,low}$	$F_{DL,high}$	
21	1447.9 MHz	1462.9 MHz	1495.9 MHz	1510.9 MHz	FDD
22	3410 MHz	3490 MHz	3510 MHz	3590 MHz	FDD
23	2000 MHz	2020 MHz	2180 MHz	2200 MHz	FDD
24	1626.5 MHz	1660.5 MHz	1525 MHz	1559 MHz	FDD
25	1850 MHz	1915 MHz	1930 MHz	1995 MHz	FDD
26	814 MHz	849 MHz	859 MHz	894 MHz	FDD
27	807 MHz	824 MHz	852 MHz	869 MHz	FDD
28	703 MHz	748 MHz	758 MHz	803 MHz	FDD
29	N/A		717 MHz	728 MHz	FDD ²
30	2305 MHz	2315 MHz	2350 MHz	2360 MHz	FDD
31	452.5 MHz	457.5 MHz	462.5 MHz	467.5 MHz	FDD
32	N/A		1452 MHz	1496 MHz	FDD ²
33	1900 MHz	1920 MHz	1900 MHz	1920 MHz	TDD
34	2010 MHz	2025 MHz	2010 MHz	2025 MHz	TDD
35	1850 MHz	1910 MHz	1850 MHz	1910 MHz	TDD
36	1930 MHz	1990 MHz	1930 MHz	1990 MHz	TDD
37	1910 MHz	1930 MHz	1910 MHz	1930 MHz	TDD
38	2570 MHz	2620 MHz	2570 MHz	2620 MHz	TDD
39	1880 MHz	1920 MHz	1880 MHz	1920 MHz	TDD
40	2300 MHz	2400 MHz	2300 MHz	2400 MHz	TDD
41	2496 MHz	2690 MHz	2496 MHz	2690 MHz	TDD
42	3400 MHz	3600 MHz	3400 MHz	3600 MHz	TDD
43	3600 MHz	3800 MHz	3600 MHz	3800 MHz	TDD
44	703 MHz	803 MHz	703 MHz	803 MHz	TDD

NOTE 1: Band 6 is not applicable
NOTE 2: Restricted to E-UTRA operation when carrier aggregation is configured. The downlink operating band is paired with the uplink operating band (external) of the carrier aggregation configuration that is supporting the configured Pcell.

Tabla 3. Bandas de Operación LTE, de 21 a 44

Fuente: [22]

La Figura 2.14 muestra la resolución TEL-804-29 expedida en el 2012 por Conatel (hoy Arcotel), en asigna un nuevo número de frecuencias a CNT, Conecel y Otecel para que puedan brindar el servicio 4G en territorio Ecuatoriano, a continuación se incluyen extractos de dicha resolución [23].

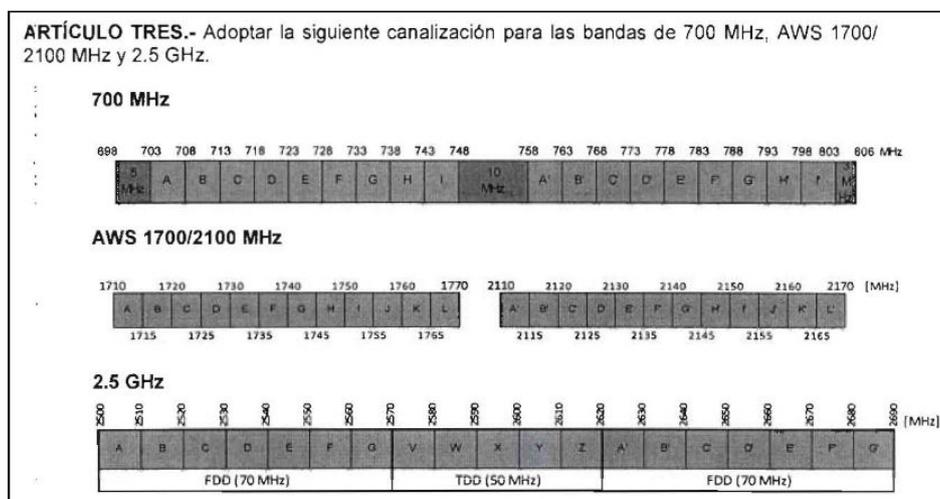


Figura 2.14. Asignación de canales en 700MHz, AWS 1700/2100 MHz, 2.5 GHz

Fuente: CONATEL Resolución TEL-804-29 [24]

En la Tabla 4 se encuentra en resumen las bandas que utilizan cada operador, actualizado a fecha Septiembre 2016.

OPERADORA	BANDA LTE	Enlace de Subida	Enlace de Bajada
CLARO	BANDA 4	1710 MHz – 1755 MHz	2110 MHz – 2155 MHz
CNT	BANDA 4	1710 MHz – 1755 MHz	2110 MHz – 2155 MHz
	BANDA 28	703 MHz – 748 MHz	758 MHz – 803 MHz
MOVISTAR	BANDA 2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz
TUENTI*	BANDA 2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz

*TUENTI: Operadora virtual que usa infraestructura de red de Movistar.

Tabla 4. Asignación de bandas LTE en Ecuador

Durante el desarrollo de esta investigación, se hace énfasis en la evaluación de la banda 4, la cual ha sido concesionada a las operadoras Claro y CNT.

- Configuraciones y recursos

Este apartado resume la configuración y los recursos de radio que se asignan durante el establecimiento y el mantenimiento de una

sesión de datos LTE, los cuales están directamente relacionados con la modulación usada en LTE, los bits representados en símbolos, las portadoras [25].

Tecnología de Múltiple acceso en enlace de bajada OFDM y OFDMA

El enlace descendente y el enlace ascendente en LTE están basados en tecnologías de múltiple acceso, específicamente *Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)* para enlace de bajada y *Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)* para el enlace de subida. OFDMA es una variante de OFDM el cual es un esquema digital de modulación de múltiples portadoras ampliamente usado en esquemas de comunicación inalámbrica, pero relativamente nuevo para telefonía celular. OFDM hace uso de un gran número de sub-portadoras ortogonales muy próximas entre sí que se transmiten en paralelo. Cada sub-portadora se modula con un esquema de modulación convencional (tales como QPSK, 16QAM, 64QAM o) a una velocidad de símbolos baja. La combinación de cientos o miles de sub-portadoras permite velocidades de datos similares a los esquemas de modulación de portadora única convencionales en el mismo ancho de banda.

En la Figura 2.15 se ilustra las características claves de una señal OFDM en la frecuencia y el tiempo. En el dominio de la frecuencia, múltiples tonos o sub-portadoras adyacentes están modulados cada uno de forma independiente. En el dominio del tiempo, intervalos de guarda se insertan entre cada uno de los símbolos para impedir la interferencia entre símbolos en el receptor causado por retrasos multi-trayecto. Se usa la Transformada rápida de Fourier o *Fast Fourier Transform (FFT)* para pasar del dominio del tiempo al de la frecuencia.

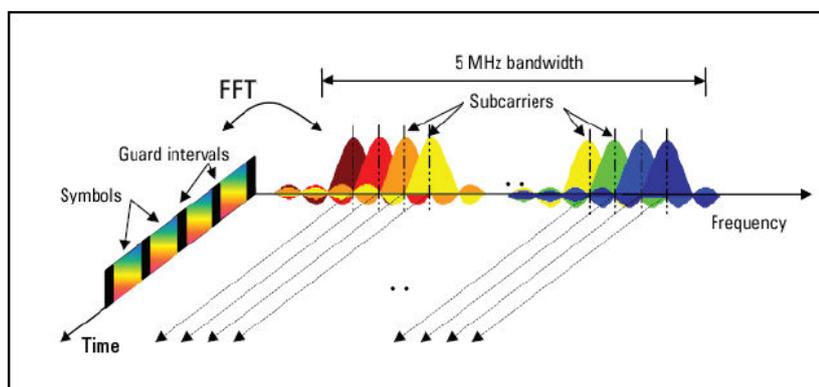


Figura 2.15. Señal OFDM representada en frecuencia y tiempo

Fuente: [25]

Aunque OFDM ha sido utilizada durante muchos años en sistemas de comunicación, su uso en dispositivos móviles es más reciente debido a que en el pasado no se tenía dispositivos móviles con la capacidad de procesamiento de señal necesaria para OFDM. En la actualidad el coste de procesamiento de señales digitales se ha reducido notablemente y OFDM ahora se considera un método comercialmente viable de transmisión inalámbrica para los teléfonos móviles. OFDMA permite subconjuntos de las subportadoras que se asignan dinámicamente entre los diferentes usuarios en el canal, como se muestra en la Figura 2.16.

El resultado es un sistema más robusto con una mayor capacidad. Esto es debido a la utilización eficaz de enlaces de usuarios de baja tasa de multiplexación y la posibilidad de programar los usuarios por frecuencia, esto proporciona resistencia al desvanecimiento selectivo de frecuencia (*frequency-selective fading*).

- Tecnología de Múltiple acceso en enlace ascendente SC-FDMA

La alta relación de pico a promedio o *peak to average (PAR)* asociado con OFDM llevó al grupo 3GPP para buscar un esquema de transmisión diferente para el enlace ascendente en LTE. Se

eligió al *Acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única (SC-FDMA)* ya que combina las técnicas de bajos valores de PAR de los sistemas de transmisión de portadora única, tales como GSM y CDMA, con la resistencia en multi-camino de acceso y la asignación de frecuencias flexibles en OFDMA. Los símbolos en el dominio del tiempo se convierten al dominio de la frecuencia usando una *transformada discreta de Fourier (DFT)*; a continuación, en el dominio de la frecuencia que se asignan a la ubicación deseada en el ancho de banda total del canal antes de ser convertida de nuevo al dominio del tiempo usando una FFT. Por último, se inserta un *Cyclic Prefix (CP)*. Debido a que SC-FDMA utiliza esta técnica, se llama a veces *DFT spread OFDM (DFT-SOFDM)*.

Para completar la generación de señal SC-FDMA, el proceso sigue los mismos pasos que para OFDMA. Realización de una transformación inversa DFT que convierte la señal desde el dominio de la frecuencia al dominio del tiempo y el hecho de insertar el CP proporciona la robustez fundamental de OFDMA contra trayectos múltiples. La relación entre el SC-FDMA y OFDMA se ilustra en las Figuras 2.17 y 2.18.

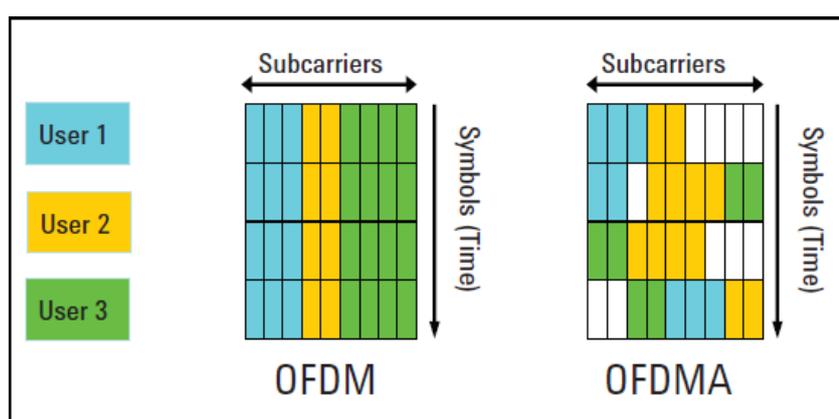


Figura 2.16. Asignación de Subportadoras en OFDM y OFDMA

Fuente: [25]

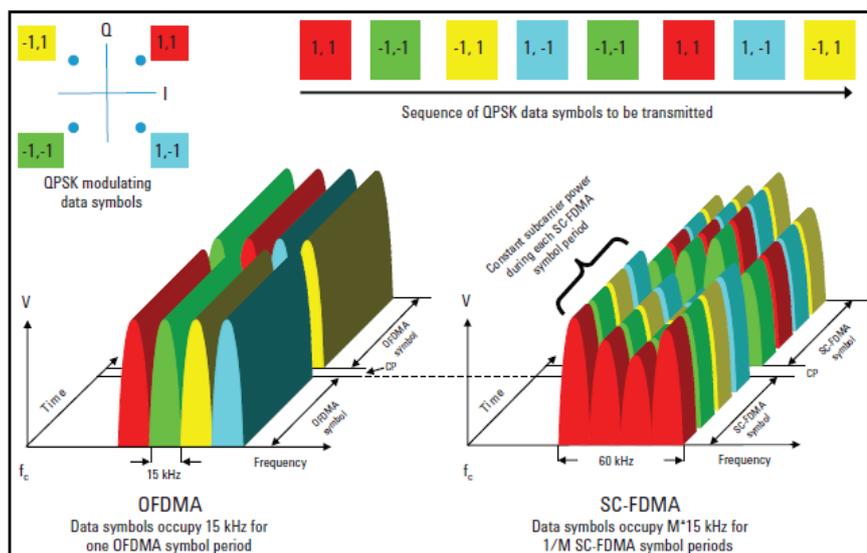


Figura 2.17. Comparación entre OFDMA y SC-FDMA transmitiendo secuencia de símbolos QPSK

Fuente: [25]

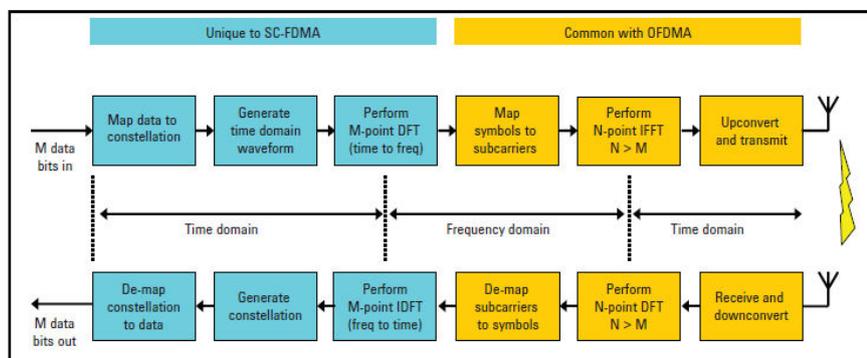


Figura 2.18. Modelo simple de generador y receptor de señal OFDMA y SC-FDMA

Fuente: [25]

La *Estructura de SLOT LTE* se muestra en la Figura 2.19 donde también se muestran los *elementos de recursos* y los *bloques de recursos* (bloques de recursos de 0,5 ms). La unidad más pequeña de frecuencia/tiempo para la transmisión de enlace descendente se denomina elemento de recurso o elemento de recurso. Un Slot se

conforma de siete elementos de recursos o símbolos, cada elemento de recurso corresponde a una sub-portadora OFDM de 15 KHz durante un intervalo de símbolo OFDM, como se muestra en la Figura 2.19. Un grupo de 12 sub-portadoras contiguas de 15 KHz corresponde a 180 KHz, que es un bloque de recursos. Los datos correspondientes a cada usuario se le asigna o en términos bloque de recurso, en un mínimo de dos bloques de recursos consecutivos, denominados *scheduling blocks* (bloques de planificación) [17].

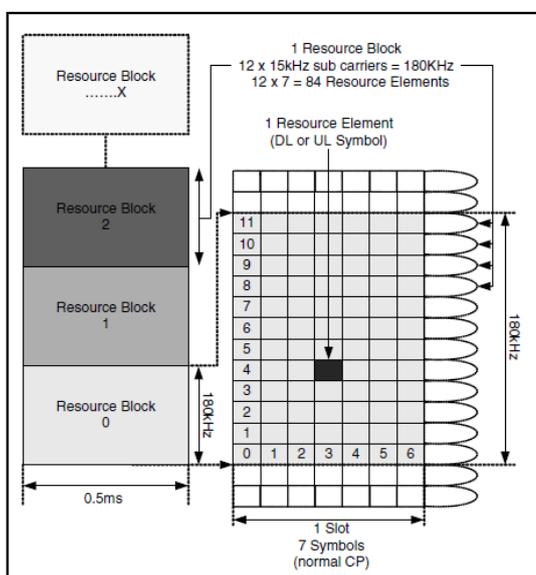


Figura 2.19. Slot en LTE, Estructura de elementos de Recursos y Bloques de Recursos

Fuente: [17]

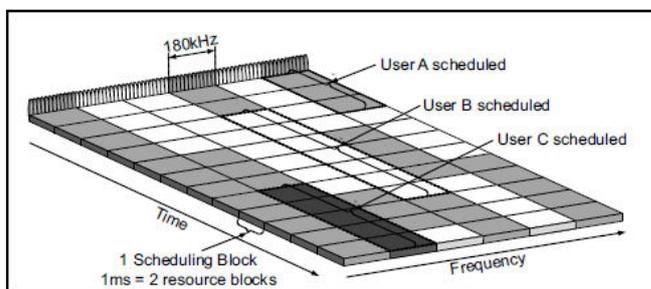


Figura 2.20. Programación de usuarios o User Scheduling

Fuente: [17]

La Figura 2.20 describe que el tráfico de usuarios diferentes se asigna a ciertas secuencias de bloques de recursos, un mínimo de dos es llamado bloques de programación. Esta es una manera muy dinámica y adaptable de asignación de recursos y maximiza el rendimiento en una celda LTE.

- Señalización

A continuación se hace un resumen sobre el protocolo de señalización utilizado en LTE, el cual es una evolución de su antecesor en 3G.

El protocolo *Radio Resource Control (RRC)* es responsable de la configuración, reconfiguración y liberación de las conexiones de la interfaz de radio, es decir, de los recursos de radio. Incluye la configuración, modificación y liberación de *Signalling Radio Bearer (SRB)*, portadoras fijas y dedicadas, junto con el control de QoS necesario y la activación de seguridad inicial. Otra función del protocolo RRC es el paging hacia los UE, el cual se utiliza en el proceso de localización de un usuario [26].

El protocolo RRC también se utiliza para proporcionar los parámetros de acceso, la información de RRC es difundida por todas las celdas de la red. El UE usa RRC para informar un conjunto de varias mediciones al eNB. Algunas de estas mediciones pueden producir traspasos del tipo intra-LTE o inter-RAT, es decir, el RRC se encarga de todos los procedimientos de movilidad. Como una función especial que se requiere para apoyar el mejor escenario *siempre activo*. RRC viene con una función de recuperación de errores que permite restablecer rápidamente una conexión RRC eliminada [26].

- Estados de RRC

A diferencia de la UMTS, donde existen 4 estados diferentes de RRC (CELL_DCH, CELL_FACH, CELL_PCH, URA_PCH, IDLE), en LTE solo se utilizan 2 estados de RRC los que indican que la conexión entre el UE y la red puede estar activada o desactivada. En la Figura 2.21 se muestran los estados de LTE - E-UTRA y su relación con los estados de RRC en GSM y UMTS. En el *RRC_IDLE* las conexiones de radio permanecen inactivas. La movilidad del UE no se encuentra bajo el control de la red y el UE no necesita enviar ningún reporte de medición para actualización. En ese estado se realiza mediciones a las celdas vecinas para realizar selección o re selección de celda. Adicionalmente se monitorea el canal de *paging* (*PCH*) para procesar llamadas entrantes. En el estado *RRC_CONNECTED*, el UE tiene la capacidad de enviar y recibir datos de carga y descarga. Además se mide la calidad el canal de radio en el enlace descendente de las celdas vecinas y el UE envía reportes de mediciones RRC de acuerdo a los reportes de mediciones recibidos.

2.2.2. Parámetros de Radio de la red LTE

A continuación se incluye un resumen de los principales parámetros de radio que el dispositivo de usuario o UE mide durante todo el tiempo que está conectado a la red, y los cuales son muy útiles para estimar la cobertura y calidad que percibe el UE de la red.

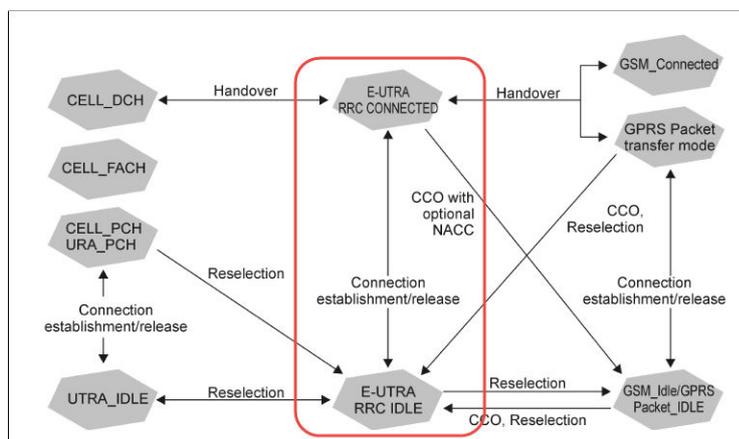


Figura 2.21. Estados RRC LTE y su relación con otras RAT

Fuente: 3GPP [26]

- Received signal code power

Received Signal Code Power (RSRP) se usa como una medida de cobertura en enlace de bajada, para las redes LTE. Mediante el protocolo RRC, el dispositivo móvil envía reportes de mediciones, los cuales incluyen valores de RSRP en formato de agrupación [26]. Los valores de RSRP se definen desde -140 dBm hasta -44 dBm con una resolución de 1dB. El principal propósito del RSRP es determinar la mejor celda en la interfaz de radio de enlace descendente y seleccionarla como celda servidora. En el RRC los reportes de mediciones que contienen RSRP son usados como criterios para disparo de eventos, como los de traspaso. Como regla general para una celda en exteriores, los resultados de las mediciones de RSRP pueden ser categorizados en tres rangos. Si el RSRP $>$ - 75 dBm, se espera obtener una excelente QoS, siempre y cuando no existan muchos usuarios conectados al mismo tiempo y exista suficiente ancho de banda disponible. Dentro del rango de -75 dBm a -95 dBm se puede esperar una ligera degradación de la QoS, por ejemplo el throughput puede decaer

entre un 30% y 50% y si el RSRP cae por debajo de valores de -95dBm, la QoS se vuelve inaceptable y el throughput se aproxima a 0 para RSRP entre -108 y -100 dBm, para niveles más bajos, se puede esperar llamadas caídas, y la imposibilidad de iniciar una sesión de datos. En la Figura 2.22 se muestra una tabla con los valores obtenidos en los reportes de mediciones en protocolo RRC.

- Reference Signal Recieved Quality

La *Reference Signal Recieved Quality (RSRQ)*, al igual que el RSRP, se usa para determinar cuál es la celda LTE con las mejores condiciones de radio para de esta forma ser designada como celda servidora. Sin embargo, mientras que el RSRP se considera como un valor absoluto de medición de potencia recibida, el RSRQ se considera como la relación señal a ruido. Al igual que el RSRP, el RSRQ también puede ser usado como criterio de traspaso de celda [26]. El RSRQ se puede calcular de manera simple en base al RSRP, según la fórmula 2.1.

$$RSRQ[dB] = 10 * \text{Log} \left(\frac{RSRP}{RSSI} \right) \quad (2.1)$$

Reported value	Measured quantity value	Unit
RSRP_00	RSRP < -140	dBm
RSRP_01	-140 ≤ RSRP < -139	dBm
RSRP_02	-139 ≤ RSRP < -138	dBm
...
RSRP_95	-46 ≤ RSRP < -45	dBm
RSRP_96	-45 ≤ RSRP < -44	dBm
RSRP_97	-44 ≤ RSRP	dBm

Figura 2.22. Mapeo Reporte de medición RRC vs. RSRP en dBm

Fuente: 3GPP [26]

El rango de reportes para el RSRQ está definido desde -19.5dB a -3dB con una resolución de 0.5 dB. Si un UE cambia su ubicación o si las condiciones de radio cambian debido a otras razones y el RSRP permanece estable o incluso mejor que antes mientras RSRQ está disminuyendo, este es un indicio de aumento de interferencia. Además si el RSRP y el RSRQ declinan en el mismo momento o lugar, esto indica claramente un área de baja cobertura. Este tipo de evaluación es muy importante para encontrar la causa de las caídas de llamadas debido a problemas de radio. Similar a lo que se describió para RSRP, para RSRQ también se pueden definir tres rangos de calidad, pero rangos son todavía muy inciertos ya que aún no se ha evaluado ningún entorno de red cargado, debido al hecho de que el número de llamadas y la ubicación de suscriptores se realizaron durante pruebas de campo. En general, los valores RSRQ superiores a -9 dB garantizan la mejor experiencia para el usuario. El rango entre -9 y -12 dB puede ser visto como neutro con una ligera degradación de la QoS. Comenzando con valores de RSRQ de -13 dB e inferiores, la QoS empeora, con disminuciones significativas de rendimiento y un alto riesgo de caída de llamadas. De similar forma que el RSRP, el RSRQ se reporta por rangos desde el 00 hasta el 34, cada rango representa un valor, un ejemplo de esto se muestra en la Figura 2.23.

Reported value	Measured quantity value	Unit
RSRQ_00	$RSRQ < -19.5$	dB
RSRQ_01	$-19.5 \leq RSRQ < -19$	dB
RSRQ_02	$-19 \leq RSRQ < -18.5$	dB
...
RSRQ_32	$-4 \leq RSRQ < -3.5$	dB
RSRQ_33	$-3.5 \leq RSRQ < -3$	dB
RSRQ_34	$-3 \leq RSRQ$	dB

Figura 2.23. Mapeo Reporte de medición RRC vs. RSRQ en dB

Fuente: 3GPP [26]

- Channel Quality Indicator

Channel Quality Indicator (CQI) es la retroalimentación de la QoE enviada por el UE (indicando qué tan buena o mala es la calidad del canal de enlace descendente que él percibe). El programador de paquetes en el eNB puede reaccionar a esta información de realimentación asignando nuevos recursos de radio, por ejemplo, se puede cambiar la *Modulation Coding Scheme (MCS)* o se pueden transmitir los siguientes bloques de datos en diferentes subportadoras que las enviadas anteriormente [26]. Los UE informan el valor de calidad de canal recibida al eNB transmitiendo un valor CQI.

El valor CQI puede representarse de dos formas: como un número escalar representa la calidad de recepción de banda ancha o como vector el cual es un informe más detallado sobre las secciones de frecuencia (sub-bandas). Los informes CQI se transmiten periódicamente o se configuran aperiódicamente por niveles superiores. Los informes CQI de sub-banda indican la calidad de recepción de cada sub-banda con respecto al promedio de banda ancha con cuatro pasos: peor, igual, mejor y mucho mejor. El UE informa de las mejores sub-bandas en comparación con la calidad media del canal con el mejor método M, como se muestra en la Figura 2.24. El UE debería escoger un esquema de MCS a partir de la información de medición anterior, el cual está indexando del 0 al 15 para adaptarse al objetivo de *Block Error Rate (BLER)* que debe estar por debajo de 10%. Esto permite la diferenciación entre los teléfonos de alto y bajo costo que utilizan hardware de RF más o menos costoso y un motor de procesamiento de señales de IQ más sofisticado.

En la Tabla 5 se muestran los valores definidos de CQI del 0 al 15 y su respectiva modulación, se detalla claramente que para un mayor

CQI obtenemos una mejor modulación y una mayor tasa de código (coding rate) [27].

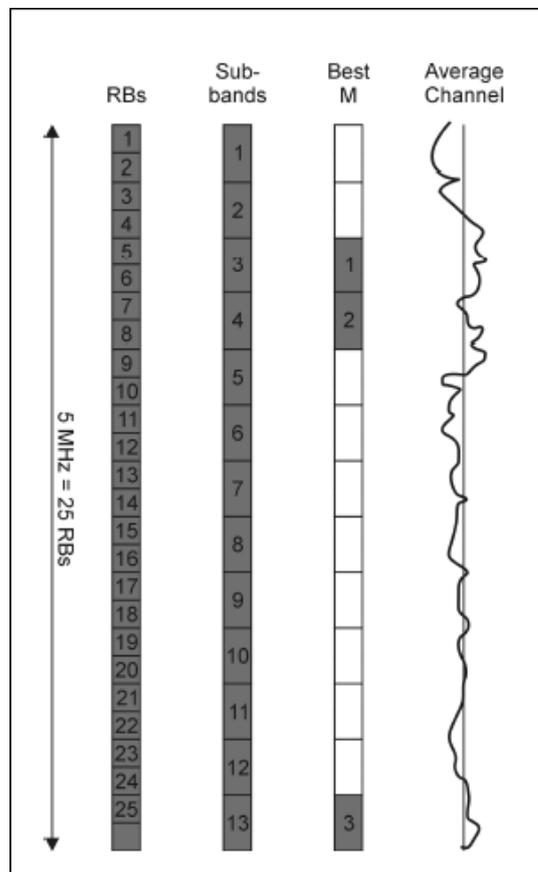


Figura 2.24. Ilustración del CQI en sub bandas y la mejor banda
M

Fuente: [27]

CQI index	Modulation	Coding rate × 1024	Bits per resource element
0	out of range		
1	QPSK	78	0.1523
2	QPSK	120	0.2344
3	QPSK	193	0.3770
4	QPSK	308	0.6016
5	QPSK	449	0.8770
6	QPSK	602	1.1758
7	16QAM	378	1.4766
8	16QAM	490	1.9141
9	16QAM	616	2.4063
10	64QAM	466	2.7305
11	64QAM	567	3.3223
12	64QAM	666	3.9023
13	64QAM	772	4.5234
14	64QAM	873	5.1152
15	64QAM	948	5.5547

Tabla 5. CQI, Modulación, Coding Rate y Bits/RE

Fuente: [27]

- **Potencia transmitida**

La potencia transmitida por el UE se puede considerar como un indicador adicional para estimar la cobertura en la zona evaluada. Es decir cuando el dispositivo se encuentra en una zona de baja cobertura, necesitará de mayor potencia para establecer la comunicación con la estación base. Este parámetro es importante, ya que a mayor potencia transmitida, el tiempo de duración de la batería del dispositivo sería menor. El control de potencia UL se implementa para hacer frente al efecto de cerca de lejos.

La Figura 2.25 muestra el efecto cerca-lejos en enlace ascendente comparado con el enlace descendente sin diferencias de potencia entre las señales de usuario ya que están igualmente atenuadas debido a que la mezcla de la señal se transmite desde una posición en el eNB [26].

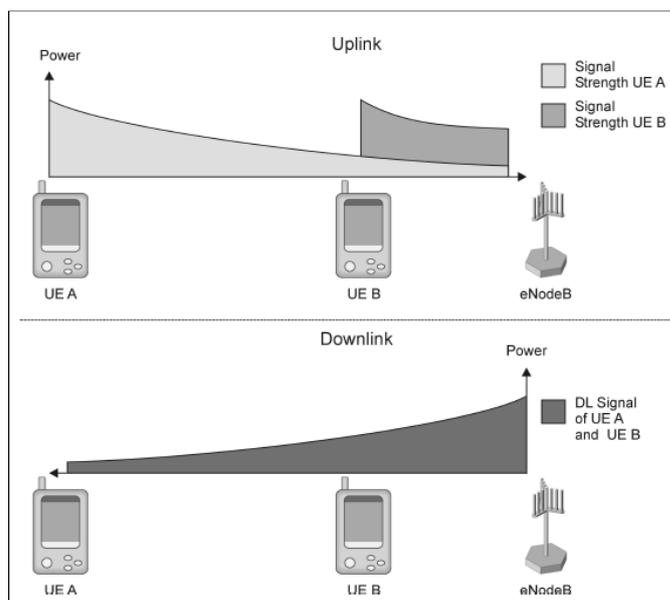


Figura 2.25. Efecto cerca-lejos en enlace de subida en comparación con enlace de bajada

Fuente: [26]

El efecto cerca - lejos ocurre cuando un usuario está cerca de la estación base y otro usuario está muy lejos de la estación base los dos usuarios están bajo la misma cobertura de la celda servidora, esta configuración introduce una pérdida de trayectoria de potencia más alta que conduce a una potencia de recepción inferior en la señal del usuario en el borde de la celda. Todas las señales de recepción de enlace ascendente deben tener la misma potencia para tener la misma saturación en el convertidor analógico a digital de cada señal, esto con el objetivo de reducir el ruido de cuantificación de los usuarios lejanos, es decir usuarios para los que se reciben señales de muy baja intensidad, de esta forma se reduce la interferencia entre sub-portadoras entre los usuarios. Esto ocurre con la sincronización de enlace ascendente imperfecta dentro de los escenarios de la vida real.

- Mejor Servidor

Como su nombre lo indica, este parámetro muestra la celda que está brindando el servicio al usuario. La manera más práctica de identificarla es con el Serving Cell ID, lo cual nos indica un único número en toda la red para la celda que nos brinda el servicio. Cada celda puede tener configuraciones físicas y lógicas diferentes a sus celdas vecinas, por este motivo es muy importante identificar la celda servidora, esto en el caso de alguna optimización o la necesidad de solventar algún problema. Uno de los parámetros fundamentales de la celda servidora es la identidad física de la celda *Physical Cell Identity (PCI)*. El PCI puede derivarse de la combinación de las señales *Primary and Secondary Sincronization Signal (PSS y SSS)* para los cuales existe un total de $3 (0 \text{ al } 1) \times 168 (0 \text{ al } 167) = 504$ Sectores [17].

- Reference Signal

La *Reference Signal (RS)* es una señal compleja hecha por el producto de la señal *PSS* y *SSS*. En consecuencia, hay 504 PCI en LTE. Los valores de PCI deben ser planificados por el diseñador de la red. Es necesaria para estimar el enlace descendente, para la detección coherente. Se envían cuatro RS por bloque de recursos *Resource Block (RB)* para el puerto de antena 0 y 1 y dos RS para los puertos 2 y 3. Las posiciones reservadas en un RB para cada antena se muestran en la Figura 2.26 [17]. Por una antena no se puede transmitir cuando se está transmitiendo un RS por la otra antena, esto para permitir una estimación de canal limpio. Una solución de 4 puertos sólo se considera para canales de variación lenta, por lo que no se necesitan tantas RS para las antenas 2 y 3.

El ajuste de los valores por defecto de RS puede influir en la cobertura de una celda LTE. Este ajuste se realiza en pasos de dB, es decir la reconfiguración del parámetro RS puede ser considerada para la optimización de la cobertura LTE de una celda específica. En la Figura 2.26 se muestra la configuración de la señal de referencia, para antenas de uno, dos y cuatro puertos (representada en el cuadro gris) [17].

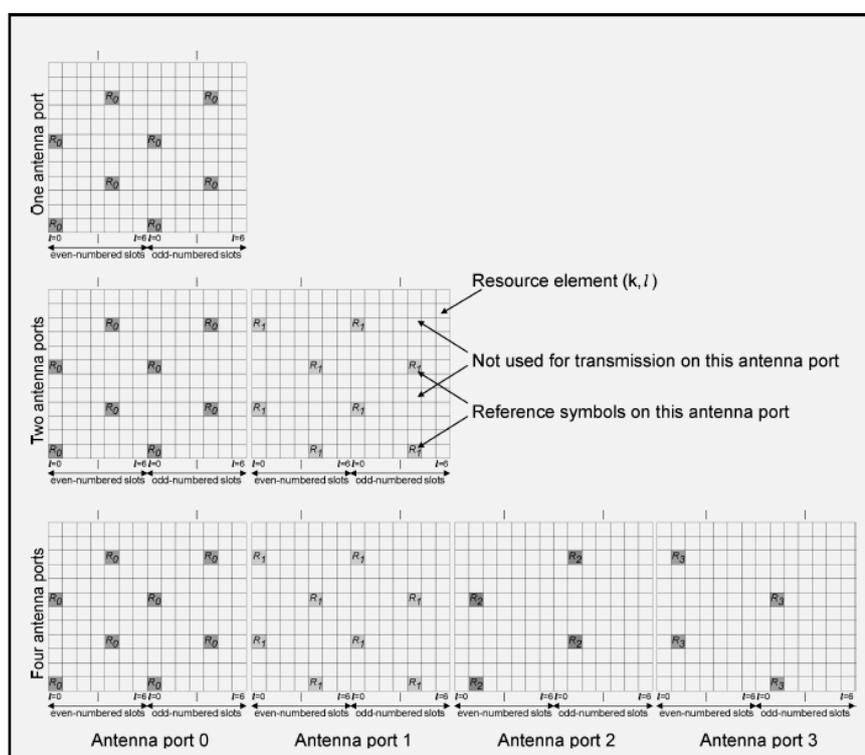


Figura 2.26. Configuración de puertos de antena/Reference Signal

Fuente: [17]

- Handover y comportamiento en frontera

Los procesos de hadover o traspasos están directamente relacionados con los parámetros antes estudiados: RSRP, RSRQ, RRC... El traspaso se puede desarrollar por las interfaces X2 y S2.

Traspaso inter eNB sobre X2. Se lleva a cabo cuando el UE no abandona el área de cobertura LTE (Figura 2.27). Se desarrolla en 3 pasos principales y un procedimiento de actualización *Tracking Area Update* (que se lleva a cabo una vez el UE esté en la nueva celda) tal como se muestra gráficamente en la Figura 2.28.

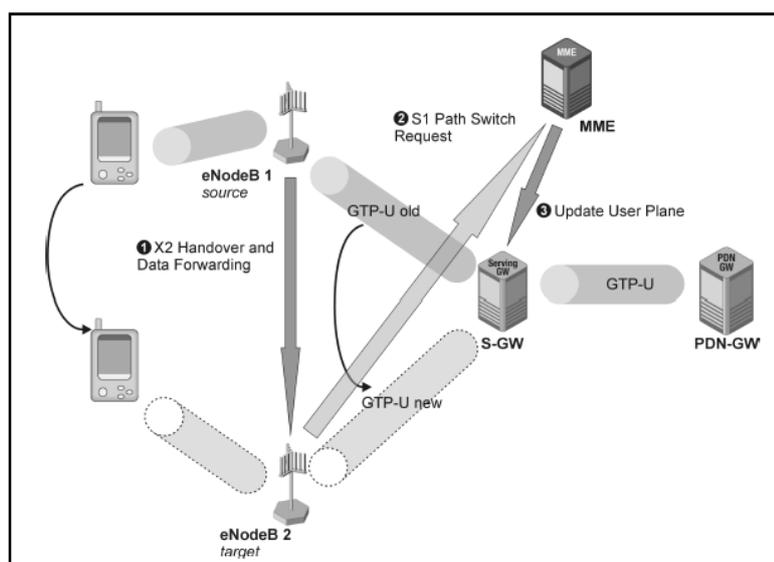


Figura 2.27. Handover Inter eNB sobre interfaz X2

Fuente: [26]

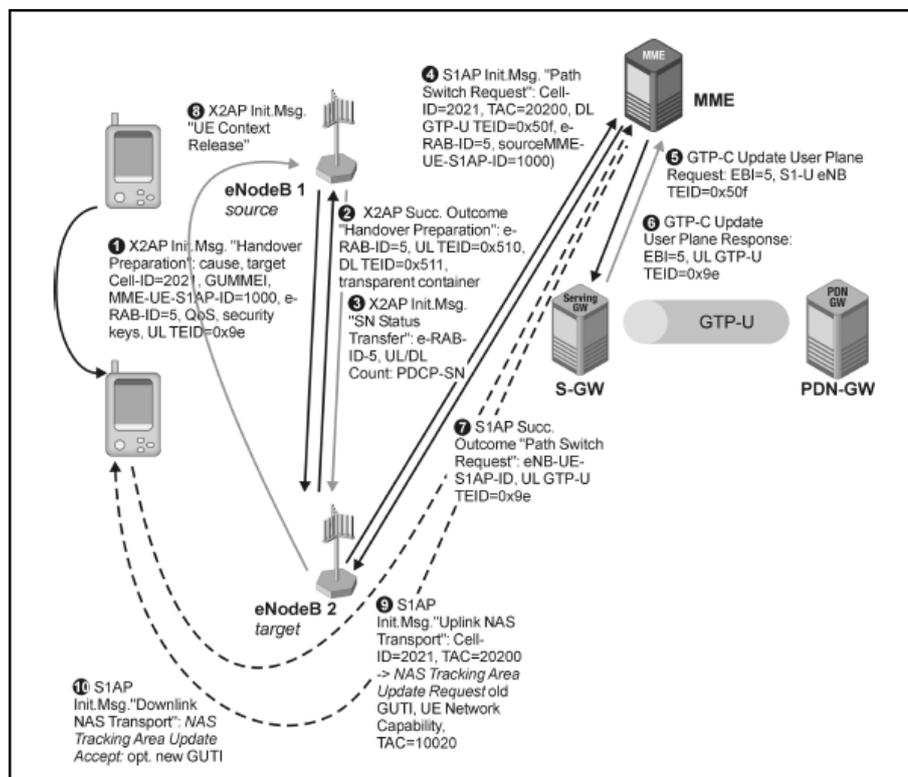


Figura 2.28. Handover Inter eNB sobre interfaz X2 – Flujo de mensajes

Fuente: [26]

Los tres pasos principales para el traspaso sobre la interfaz X2 son los siguientes:

1. Procedimiento de preparación de traspaso para conectar el eNB fuente y el eNB objetivo entre sí. Durante este procedimiento, se establece una conexión de señalización utilizando la parte de aplicación X2 (X2AP), así como un túnel de plano de usuario temporal para reenviar datos de plano de usuario no enviados desde la fuente al eNB de destino.
2. Procedimiento de petición de conmutación de trayecto S1AP; mediante el cual el eNB objetivo actualiza el MME con la nueva posición geográfica del UE y solicita una nueva camino para el túnel GTP-U en la interfaz S1-U.

3. Habilitar el nuevo camino para datos del plano de usuario en S1-UE; para lo que el MME necesita comunicarse con S-GW, básicamente para negociar los nuevos puntos finales del túnel *GPRS Tunnelling Protocol User Plane* (GTP-U).

No sólo el túnel S1-U debe ser cambiado, sino también la portadora de radio en la interfaz de aire. El UE cambia la celda en la interfaz radio, mediante un procedimiento de reconfiguración de RRC y debe entrar en la nueva célula usando el procedimiento de acceso aleatorio tal y como lo hiciera para una sesión de datos nueva. Este acceso aleatorio es obligatorio durante el traspaso y es una nueva funcionalidad de la señalización de interfaz de radio LTE.

2.3. Arquitectura de una red 4G LTE

En la Figura 2.29 se muestra la arquitectura de red LTE orientada a conectividad y servicios. Los eNB se interconectan entre sí usando la interfaz X2 y se interconectan a la red core usando la interfaz S1. El UE obtiene los servicios como Internet, *IP Multimedia Subsystem (IMS)*... a través de las capas de conectividad de servicios y conectividad IP [27].

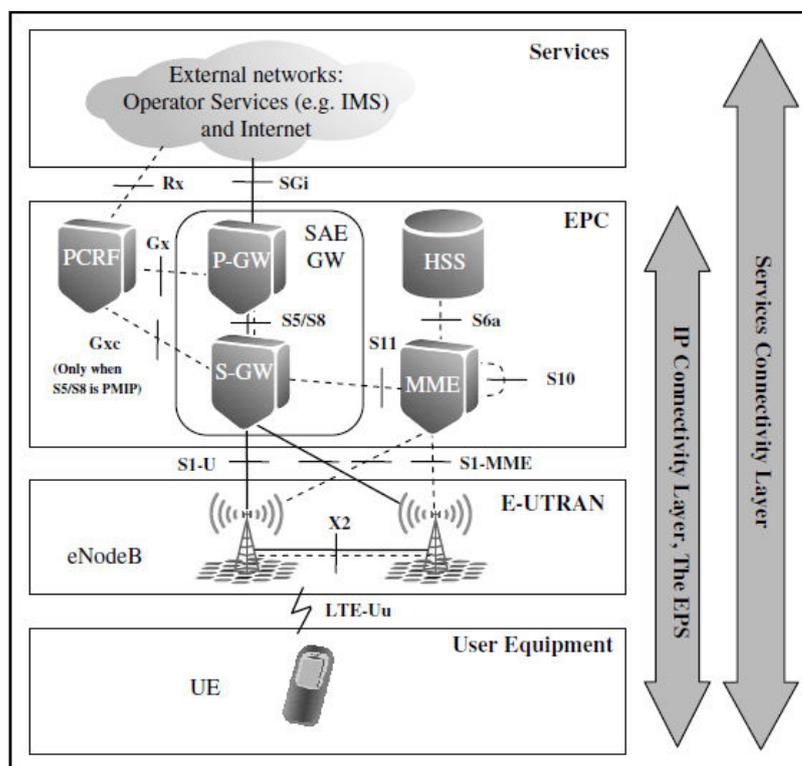


Figura 2.29. Arquitectura del sistema E-UTRAN

Fuente: [27]

2.3.1. Flujo de llamada de datos de una Red LTE

La VoIP en LTE usa el protocolo RRC para el inicio de una transferencia de datos y una llamada telefónica tradicional, normalmente se usa el procedimiento CSFB el cual hace un retorno a otra tecnología de red móvil (generalmente UMTS). En este trabajo nos enfocamos en LTE únicamente; para un estudio más detallado del procedimiento CSFB se recomienda el estudio de la especificación 23.272 - 3GPP, o para un resumen más detallado consultar páginas especializadas como TelecomHall [15].

El procedimiento de configuración de conexión RRC comienza cuando un eNB recibe una RS de acceso aleatorio *Media Access Control (MAC)* con un índice de preámbulo válido y una identidad temporal de red de radio de acceso aleatorio (RA-RNTI) [26] que se

utiliza como una identidad temporal del abonado durante el acceso aleatorio y debe ser reemplazado por un *C-RNTI* en el paso siguiente cuando el eNB envía una respuesta de acceso aleatorio MAC al UE. Esta respuesta de acceso aleatorio se envía como cualquier otra señal de enlace descendente en el canal compartido de enlace descendente *Downlink Shared Channel (DL-SCH)*. En E-UTRAN no existe un canal de control común físico, separado para la señalización en el enlace descendente, en comparación con las tecnologías GERAN y UTRAN las cuales si lo tienen. Toda la información, la señalización y el plano del usuario se asignan al DL-SCH.

El UE puede identificar la respuesta de acceso aleatorio MAC enviada por el eNB en nombre de su índice RA-RNTI y su preámbulo. Con este mensaje se asigna un *Cell Radio Network Temporary Identifier (C-RNTI)* al teléfono, se asigna el comando de avance de temporización inicial (timing advance command) y, opcionalmente, se conceden algunos recursos de enlace ascendente. En ese momento, el UE puede enviar el mensaje de petición de conexión RRC que contiene C-RNTI recibida previamente y la identidad NAS del UE almacenada en la tarjeta USIM. En el caso de que el UE no se haya conectado previamente a la red, se utilizaría la IMSI en lugar de una ID NAS temporal, o bien la *SAE-Temporary Mobile Subscriber Identity (S-TMSI)*. Como alternativa, la capa MAC enviaría un mensaje separado de resolución de contención, incluyendo el C-RNTI temporal y el ID de resolución de contención. El propósito del procedimiento de resolución de contención es convertir el C-RNTI temporal en un C-RNTI permanente o semipermanente que puede usarse para identificar todas las tramas MAC enviadas desde un UE particular en el enlace ascendente y DL-SCH del E-UTRA. En respuesta al mensaje de petición de conexión RRC enviado por el UE, el eNB enviará el mensaje de configuración de conexión RRC. Al igual que antes, la respuesta de acceso aleatorio MAC, se envía en el DL-SCH, pero se transporta en un mensaje MAC de canal compartido

de enlace físico (PDSCH). El canal lógico utilizado para enviar este mensaje RRC es el *Canal de Control Común (CCCH)*. Por lo tanto, este mensaje se envía *en control de enlace de radio (RLC)*, se espera recibir del UE en la capa RLC el modo *Unacknowledged Mode (UM)*. El mensaje MAC PDSCH que transporta el mensaje de configuración de conexión RRC contiene el PCI. Este es el scrambling code utilizado para distinguir inequívocamente la celda servidora, de sus celdas vecinas que se superponen en una región geográfica. De hecho, el PCI tiene la misma función que el *primary scrambling code (PSC)* en la UTRAN.

El orden de modulación para la transmisión descendente de este mensaje proporciona información importante. A partir de la salida del decodificador se puede detectar que se utiliza la modulación de desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK) para transmitir este mensaje en la interfaz de radio. El *Logical Cell Identifier (LCID)* igual a cero es utilizado por el protocolo *Radio Link Control Unacknowledged Mode (RLC UM)* y el tipo de *portador de radio (RB-Type)* proporciona la información adicional en comparación a la información del plano de control que se transporta en este canal lógico. El mensaje de configuración de conexión de RRC en sí mismo contiene la identidad del portador de radio de señalización (SRB-1) y los parámetros asociados para esta portadora. En primer lugar, hay una secuencia de parámetros de configuración de RLC, especialmente temporizadores y contadores para el modo de reconocimiento de modo *Radio Link Control Acknowledged Mode (RLC AM)*. La siguiente sección del mensaje de configuración de la conexión RRC, (en la Figura 2.30 se muestra un ejemplo del contenido típico de un mensaje de requerimiento de conexión RRC). Un mensaje de reconfiguración RRC contiene ajustes para el informe del CQI.

ID Name	Comment or Value
59 05:43:35,520,954 RRC-UU K2AIR-PHY PUSCH LTE-RLC/MAC RLC-REASM-PDU (UL) LTE-RRC_CCCH_UL	
rrcConnectionRequest	
Tektronix K2Air LTE PHY Data Message Header (K2AIR-PHY) PUSCH (= PUSCH Message)	
1 PUSCH Message	
1.1 Common Message Header	
Protocol Version	0
Transport Channel Type	UL-SCH
Physical Channel Type	PUSCH
System Frame Number	551
Direction	Uplink
Radio Mode	FDD
Internal use	0
Status	Reassembled RLC PDU
Reserved	0
Physical Cell ID	0
UE ID/RNTI Type	C-RNTI
Subframe Number	1
UE ID/RNTI Value	'bebl'H
RRC (CCCH UL) 3GPP TS 36.331 V8.5.0 (2009-03) (LTE-RRC_CCCH_UL) rrcConnectionRequest	
(= rrcConnectionRequest)	
UL-CCCH-Message	
1 message	
1.1 Standard	
1.1.1 rrcConnectionRequest	
1.1.1.1 criticalExtensions	
1.1.1.1.1 rrcConnectionRequest-r8	
1.1.1.1.1.1 ue-Identity	
1.1.1.1.1.1.1 s-TMSI	
1.1.1.1.1.1.1.1 mmeC	
1.1.1.1.1.1.1.2 m-TMSI	
1.1.1.1.1.1.2 establishmentCause	
1.1.1.1.1.3 spare	

Figura 2.30. Ejemplo de mensaje Requerimiento de conexión RRC

Fuente: [26]

La última sección del mensaje se ocupa de la configuración de los parámetros de solicitud de programación.

Se envía una solicitud de programación si el búfer de datos de enlace ascendente en el UE detecta que no está provisto de suficientes recursos de radio de enlace ascendente. Por lo tanto, todos estos parámetros, información de antena, así como la configuración de solicitud de programación tienen un impacto directo en la calidad de servicio percibida por el usuario. En ese momento, si el UE recibió con éxito el mensaje de configuración de conexión de RRC responde con un mensaje de *RRC Connection Setup Complete*. Este mensaje es el primer mensaje de señalización de una conexión enviada en el canal de control dedicado (*DCCH*). El mensaje completo de

configuración de conexión de RRC transporta los mensajes de solicitud de conexión de NAS y de petición de conexión de *Packet Data Protocol (PDP)*. Es el primer mensaje en esta traza transportada por el *Protocolo de Convergencia de Datos de Paquetes (PDCP)*. En la cabecera de PDCP está el número de secuencia de PDCP para control de flujo y detección de errores, así como el código de autenticación de mensaje *MAC-Integrity (MAC-I)* para protección de integridad. Dado que el procedimiento de modo de seguridad RRC todavía no se ha ejecutado, el campo MAC-I contiene el valor predeterminado con todos los bits establecidos a cero. El PDCP y sus niveles superiores están incrustados en un mensaje MAC *Physical Uplink Control Channel (PUCCH)*. En la capa MAC está el C-RNTI como la identidad del UE, la comprobación del *Cyclic Redundancy Check (CRC)* para el *Transport Block (TB)*, la información de CQI y un indicador de ACK/NACK de enlace descendente para reconocer la recepción exitosa de los TB de enlace descendente previamente enviados que contenían la configuración de conexión RRC mensaje. El orden de modulación utilizado para enviar este mensaje en la dirección de enlace ascendente sigue siendo QPSK y el portador de radio ID = 1, que es un plano de control SRB. Los mensajes NAS se transmiten por la S1AP y los mensajes UE iniciales se reenvían de forma transparente a la MME a través del punto de referencia S1. En la Figura 2.31 se muestra el proceso de configuración RRC durante el establecimiento de una sesión LTE, la cual resume lo que se comenta en el párrafo anterior.

2.3.2. Relación entre flujo de llamada de VoIP y flujo de llamada en una Red LTE

En la Figura 2.32 se muestra un ejemplo de una transacción VoIP usando el protocolo *Session Initiation Protocol (SIP)*, el cual consiste en un grupo de requisitos y respuestas [28]. De manera general al

comparar los dos protocolos de inicio de sesión, claramente podemos identificar que el SIP es mucho más sencillo que el RRC. Aunque los dos protocolos se utilizan para iniciar una sesión, hay que recalcar que el RRC trabaja sobre la interfaz de radio de LTE, por lo que debe ser mucho más robusto, mientras que SIP trabaja sobre IP (que no exige un nivel elevado de robustez). La tecnología VoLTE utiliza SIP para iniciar una sesión de VoIP sobre la E-UTRAN. Por esto al final los flujos de llamadas de LTE y de VoIP convergen en un solo flujo compuesto por dos partes: primero se inicia la sesión de datos con RRC y segundo se completa con SIP, por ejemplo para registrarse en el servidor proxy, o para iniciar una llamada.

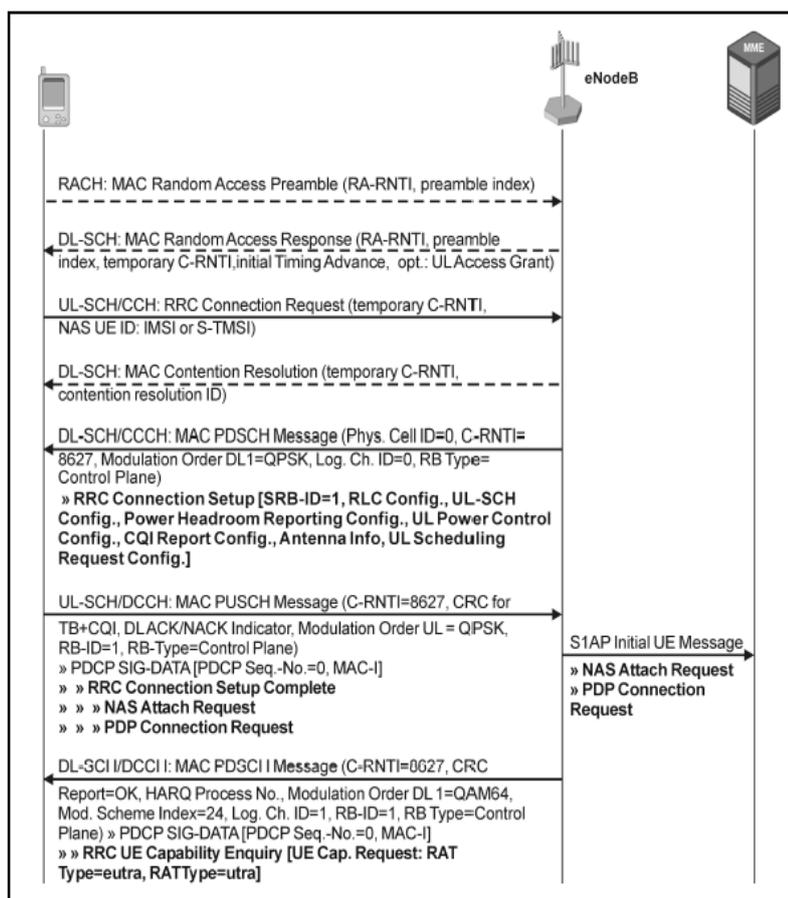


Figura 2.31. Proceso de configuración RRC durante establecimiento de sesión

Fuente: [26]

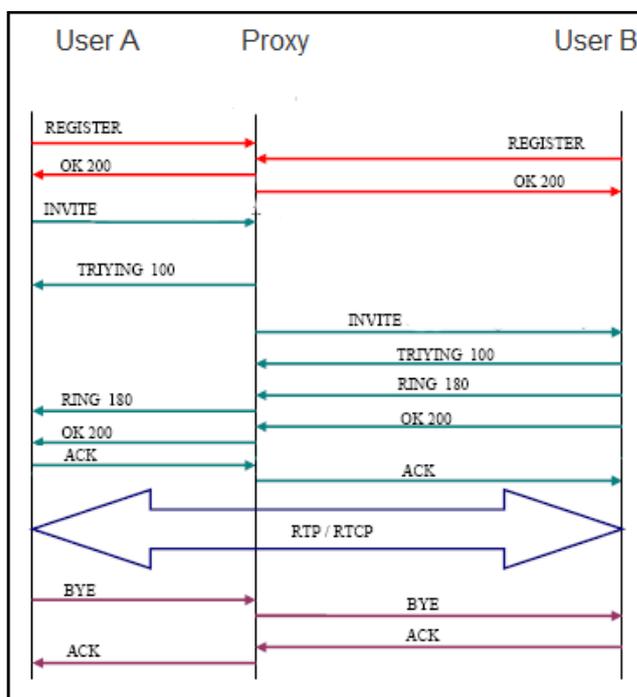


Figura 2.32. Ejemplo comunicación SIP

Fuente: [28]

2.4. Generalidades de un sistema de VoIP

La VoIP es una tecnología usada para establecer una comunicación multimedia sobre IP [27]. A continuación revisamos algunos conceptos básicos de VoIP.

2.4.1. VoIP

Los proveedores de servicios han aprovechado Internet para ofertar VoIP [28] para ahorrar costes de la telefonía tradicional y agregar servicios de valor agregado. El objetivo es convertir en usuarios cotidianos a los clientes tradicionales y ganar nuevos clientes entre la población más joven. En cambio, el principal beneficio para una compañía de telecomunicaciones es el aumento de la eficiencia de la red para manejar el tráfico de voz y la capacidad adicional de

introducir nuevos ingresos generados por los servicios integrados de voz y datos.

Con la VoIP se puede suprimir silencios para ahorrar transmisión de datos irrelevantes. Utilizar una cantidad adaptativa de ancho de banda haciendo compresión adaptativa de los datos. Para lograr un ahorro de ancho de banda, los proveedores de servicios deben calcular cuidadosamente el nivel correcto de compresión de voz para lograr el nivel deseado de calidad de voz, ya que una alta compresión puede degradar la calidad de voz de una llamada. Además, IP puede utilizar eficientemente la red de transporte subyacente mediante la transmisión de datagramas IP sólo cuando sea necesario. Por lo tanto, una red VoIP puede manejar un mayor volumen de llamadas en comparación a una red TDM de circuito conmutado, utilizando la misma infraestructura de transmisión. Este ahorro es más dramático en las llamadas de larga distancia porque VoIP ahorra en los costos de enlace por satélite.

Después de desplegar una red VoIP, los servicios mejorados, como: minutos al por mayor, minutos al por menor, llamada por Internet y mensajería unificada, ofrecen oportunidades de ingresos adicionales a los proveedores de servicios como servicios de valor agregado.

Los beneficios de VoIP para un proveedor de servicios también incluyen lo siguiente:

- Reducción del coste total de propiedad de las plataformas de voz y datos.
- Ahorro en *CAPital EXpenditures (CAPEX)*, mantenimiento y costos de operación.
- Creación de redes convergentes sin fisuras por un sistema de infraestructura de conmutación.
- Fácil escalabilidad.
- Reducción del tiempo de activación del sistema.

- Ahorro de ancho de banda.
- Rápida creación y despliegue de nuevos servicios generadores de ingresos.

2.4.2. Calidad de Servicio en VoIP

En la VoIP se entremezclan al menos dos tipos de redes: las redes de telefonía tradicionales (que están optimizadas para el transporte de voz) y las redes que transportan datagramas IP. La red IP no tiene por qué estar optimizada para el transporte de voz por lo que es el principal cuello de botella en VoIP.

Existen varios mecanismos para optimizar la QoS de la VoIP:

- *Aprovisionamiento de ancho de banda*: tenemos dos casos distintos, cuando el ancho de banda es:
 - *Inadecuado en la red IP*: suele ocurrir en los casos en los que la red ya existía antes de ser pensada para soportar VoIP.
 - *Adecuado en la red IP*: se suele mejorar la red para dar un mínimo soporte a VoIP.
 - *Sobre-aprovisionado (best effort)*: se provee de ancho de banda adicional al adecuado intentando eliminar problemas de congestión [28]. Este caso de diseño se elige porque el costo del ancho de banda para el proveedor de servicios es barato o debido a un conocimiento limitado de QoS.

En cualquier caso los encaminadores IP deben configurarse correctamente para manejar paquetes de voz. En caso contrario se producen saltos en una conversación de voz eco [29].

- Clasificación de datagramas.
- Vigilancia y medición.
- Marcado de datagramas.
- Colas y modelado de colas.

- Fragmentación de datagramas.
 - *Servicios Integrados (IntServ)*, asegura QoS en redes de computadoras.
 - *Servicios Diferenciados (DiffServ)*, asegura QoS en grandes redes.
- Para medir la QoS, tradicionalmente, se ha usado una serie de parámetros que definimos brevemente a continuación:

- *Jitter*: promedio de las desviaciones de la latencia media de la red. Es un parámetro QoS importante para los servicios en tiempo real que utilizan *User Datagram Protocol (UDP)* debido a su sensibilidad de retraso [26].
- *Retraso de extremo a extremo*: causado por la conmutación, propagación y serialización. El retraso de extremo a extremo es una característica de red importante que debe mantenerse en los niveles correctos.
- *Pérdida de paquetes*: afecta drásticamente la calidad de un servicio VoIP [29].
- *Error en los datagramas*: El protocolo IPv4 comprueba el checksum de encabezado de mensaje y descarta los datagramas defectuosos. IPv6 no comprueba el encabezado para mejorar la velocidad de reenvío [30] [21].
- *Entrega desordenada de datagramas*: debido a la naturaleza propia de IP.

2.4.3. Experiencia de usuario en VoIP

En principio, podría existir una correlación entre la QoS y la QoE. Esto quiere decir que para mejor QoS, obtendríamos mejor QoE. Sin embargo, en la práctica, no tiene por qué existir esta relación directa. Pudiendo existir una QoS deficiente y en cambio el usuario manifestar que la QoE que experimentó no lo es. Esto es debido a que la QoE incluye un porcentaje elevado de valoración subjetiva.

Pudiendo variar la QoE de un usuario a otro que estuviera en la misma conversación VoIP.

Ejemplos de medidas subjetivas de la QoE son:

- *Mean Opinion Score (MOS)*: medida subjetiva de calidad de voz en base a opinión de usuarios que han utilizado el servicio.
- *Absolute Category Rating (ACR)*: medida subjetiva de calidad de video en base a la percepción de usuario desde malo hasta excelente.
- *Degradation Category Rating (DCR)*: es usado como contraparte del ACR cuando sus resultados no son los esperados. DCR compara una señal A correcta versus una señal B degradada y usa MOS para identificar la calidad al comparar A con B.

Si Internet experimenta pérdida de datagramas, error, retraso, Jitter... es muy probable que la QoE empeorarse, observada desde el punto de vista objetivo. Uno de los objetivos de este trabajo es identificar las condiciones mínimas de la red LTE para establecer una llamada de VoIP con suficiente QoS y QoE para mantener una comunicación de voz. En estas condiciones se debe analizar cuál de los parámetros de QoS afecta de forma objetiva a la QoE. Debido a la naturaleza del estudio y su complejidad de medidas a realizar sólo estamos interesados en observar la variabilidad de los parámetros de QoS para inferir que se produciría una pérdida de QoE. Esto es, no hacemos medidas subjetivas de QoE.

La QoE también se relaciona a los CODEC que puede usar VoIP, ya que mientras mayor sea el ancho de banda utilizado por el CODEC de voz, la experiencia de usuario será mucho mejor. Nosotros no realizamos estudios específicos sobre CODEC, por las mismas razones que no analizamos medidas de QoE.

2.4.4. Principales afectaciones en VoIP

En los siguientes apartados se trata de describir las principales afectaciones o problemas que ocurren en una red IP durante una llamada de VoIP. Estas afectaciones son las principales causantes de problemas de QoS.

- Jitter

Existen varias definiciones de medición de Jitter UDP. El análisis de jitter UDP más utilizado, es el jitter basado en la fecha y hora de llegada de los paquetes UDP recibidos posteriormente en el punto de medición. Para el cálculo del jitter UDP podemos utilizar la fórmula 2.2. En esta fórmula, las muestras de mediciones de latencia individuales para dos paquetes recibidos en secuencia uno de tras de otro y del mismo flujo se definen como D_i y D_j y la diferencia de estos dos resultados de medición de latencia se define como $J(j - i)$:

$$J_1 = 0, J_2 = (2,1), J_i = J_{i-1} + \frac{(|J(i,i-1)| - J_{i-1})}{16} \Big|_{i=3}^{\infty} \quad (2.2)$$

En la fórmula 2.2, el factor 16 que se encuentra en el denominador de la ecuación es un factor de suavizado propuesto en RFC 1889, el documento de especificación estándar para RTP.

El jitter, tiene un impacto significativo en la calidad de la voz. En el Gateway de recepción, un búfer de intermitencia pone en cola (query) los paquetes entrantes para la reproducción. Si una red tiene un alto jitter, puede utilizar un buffer de jitter grande, sin embargo, un buffer de jitter grande afecta directamente al delay o retraso de extremo a extremo. Dado que los usuarios pueden percibir un retraso de extremo a extremo que supera aproximadamente 150 ms, es recomendable utilizar pequeños

buffers de jitter, lo que significa que la propia red debe tener una cantidad relativamente pequeña de jitter [29].

Los contribuyentes al jitter incluyen lo siguiente:

- Una cola congestionada hace que los paquetes se transmitan al enlace del encaminador saliente con retrasos variables. Éste es generalmente el contribuidor más significativo al jitter.
- Procesamiento del encaminador y retrasos de serialización de paquetes de tamaño variable.

Incluso en los casos en que los retrasos de extremo a extremo son pequeños, como 50 ms, un gran cambio en el retraso puede producir una calidad de voz inaceptable. Los búferes de jitter se configuran típicamente a 60 ms, lo que permite una variación de retraso de 60 ms y aumenta el retraso de reproducción de voz en la misma cantidad (60 ms). Los búferes adaptativos con valores mínimos pueden minimizar el jitter. Los buffers adaptativos de jitter aprenden la cantidad de jitter en la red durante cada llamada de voz y acortan o alargan el tamaño del búfer de Jitter. Siempre que el jitter sea menor que el tamaño del búfer del receptor, entonces el jitter será imperceptible para el usuario final.

Si una muestra de VoIP (es decir, un paquete RTP) llega demasiado temprano o demasiado tarde para encajar en el buffer de jitter, la muestra se elimina. Esta muestra caída tiene el mismo impacto negativo en la calidad de voz que la pérdida de paquetes.

- Retraso

El valor objetivo del retraso o delay es de 150 ms el cual se utiliza comúnmente como el presupuesto de retraso unidireccional para el umbral de retraso percibido por el usuario. El usuario percibe una calidad de voz disminuida de la llamada si el retraso excede del

umbral de 150 ms. El objetivo, por lo tanto, debe ser mantener el umbral por debajo de 150 ms para sostener llamadas de voz de alta calidad. Se debe recordar que varios componentes, incluidos los componentes de red y no red (por ejemplo, el procesamiento de CODEC DSP en los puntos finales) contribuyen al retraso de extremo a extremo [29].

Este valor se define en la Recomendación G.114 de la *Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT)*. El valor objetivo a alcanzar los 150 ms, pero no en todos los casos. Los retrasos de extremo a extremo más largos hoy en día se encuentran en el rango de 200 ms, a la vez que proporcionan una calidad de voz aceptable a muchos usuarios. Los retrasos de 150 ms y 200 ms son aplicables a los paquetes de carga de voz. Se aplican requisitos diferentes a los paquetes de señalización.

Post Dial Delay (PDD) es otra categoría de retraso. PDD se define como el período entre el último número que está siendo marcado y el teléfono distante que suena. La mayoría de las llamadas domésticas tienen un PDD de menos de dos segundos, y las llamadas internacionales pueden tener un PDD de hasta cuatro o más segundos. La presencia de grandes retrasos de señalización o pérdida de paquetes de los paquetes de señalización será un factor significativo en el aumento del PDD de la llamada.

- **Pérdida de datagramas**

El objetivo de diseño para una red VoIP debería ser cero pérdida de datagramas. La pérdida de paquetes suele ser causada por una red de mala calidad, como altas tasas de error de bits *Bit Error Rate (BER)* en enlaces o congestión de la red. Los rebasamientos o pérdidas de memoria intermedia de jitter tienen el mismo impacto en la calidad de voz que la pérdida de paquetes. La pérdida de

paquetes afecta gravemente la calidad de la llamada de voz y recortes (salto en la conversación).

La pérdida de paquetes puede ocurrir debido a problemas de temporización como ejemplo: exceso de jitter o pérdida – falta de sincronismo del reloj entre los puntos finales de VoIP.

Si se pierde un paquete, se suele reenviar; pero en VoIP, las retransmisiones no son buenas porque pueden crear una conversación donde las palabras están fuera de orden o más distorsionada [31].

- Paquetes con errores

Los datagramas IP y UDP que se hayan corrompido, serían detectados por el encabezado checksum, y serían descartados: se considerarían como datagramas perdidos, lo que traducido a VoIP sería considerado como silencios.

Durante el desarrollo de esta investigación, se analiza la pérdida de paquetes y los paquetes con errores.

- Entrega desordenada de datagramas

Los paquetes desordenados pueden no afectar el rendimiento si hay muy poco tiempo entre su llegada prevista y su llegada real. Por ejemplo, si dos paquetes llegan en orden inverso, pero los paquetes llegan en 1 ms, es improbable que esto cause un problema [31]. En cambio, si los paquetes fuera de orden llegan después de un gran retraso, o hay muchos paquetes fuera de orden, puede existir una notable degradación en el rendimiento.

- Eco

No se considera una afectación de QoS, sino como el resultado de la misma. Es decir en una red IP no se define eco en paquetes de datos, el eco se genera al decodificar los paquetes de voz. Podría darse el caso que la red haga re-envío de paquetes los que lleguen al destino duplicados, por lo que al ser decodificado genera el eco o repetición.

2.5. Arquitectura de un sistema de VoIP

En la siguiente lista, se detallan los protocolos y aplicaciones más importantes para VoIP [26]:

- SIP y H.323.
- Media Gateway Control Protocol (MGCP).
- Gateway Control Protocol (Megaco, H.248).
- Real-time Transport Protocol (RTP).
- Real-time Transport Control Protocol (RTCP).
- Secure Real-time Transport Protocol (SRTP).
- Session Description Protocol (SDP).
- Inter-Asterisk eXchange (IAX).
- Jingle XMPP VoIP extensions.
- Skype.

A continuación se detalla las arquitecturas de redes de VoIP SIP debido a que en la actualidad es la más aceptada y de mayor uso y por el hecho de que es usada para nuevas aplicaciones como por ejemplo VoLTE [29].

SIP (RFC 2543 y actualizado en la RFC 3261) es un protocolo punto-a-punto que utiliza mensajes codificados en texto, dirigido a aplicaciones de en general y específicamente para mensajería instantánea y VoIP [29]. En la Figura 2.33 se muestra un ejemplo de la arquitectura SIP, la cual usa varios componentes principales [29]:

- *User Agent (UA)*: SIP admite dos tipos de agentes de usuario: *User Agent Client (UAC)* y *User Agent Server (UAS)*. Los agentes de usuario SIP originan y terminan las solicitudes SIP.
- *Gateway*: su principal función es de traducir funciones para el establecimiento y terminación de llamadas entre la red IP y las redes telefónicas nativas (protocolo para la configuración y liberación de llamadas, conversión de formatos de medios de una red a otra y transferencia de información). Se debe tener un plan de marcado entre gateways.

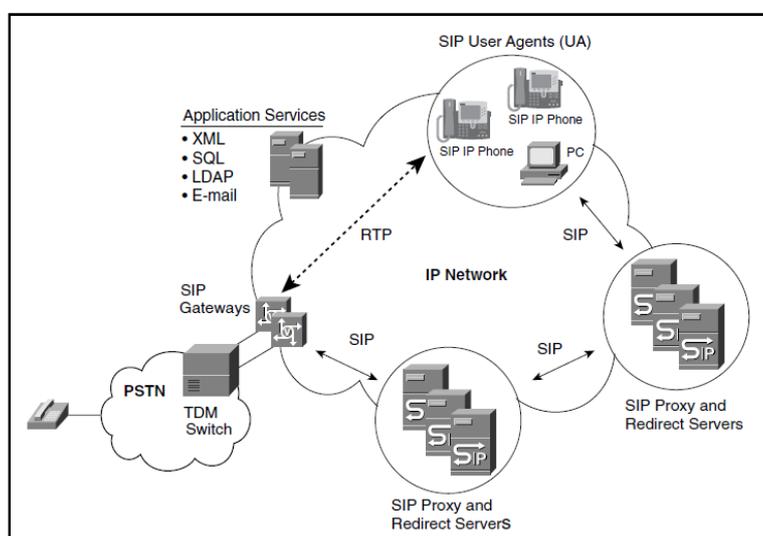


Figura 2.33. Arquitectura de Red VoIP SIP

Fuente: [29]

- *Server*: cada UA en la red SIP debe registrarse con un servidor registrador para notificar al servidor la dirección a la que puede ser alcanzado. Se emite un mensaje SIP REGISTER a este servidor. Un Gateway UA, no puede enviar este mensaje al servidor SIP local. Después del registro, un cliente SIP puede emitir un mensaje de petición SIP INVITE a un servidor SIP. La solicitud INVITE establece una llamada SIP. Este servidor puede ser un servidor proxy SIP o un servidor de re direccionamiento SIP. Existen tres tipos de servidores SIP:

- *Proxy Server*: realiza el encaminamiento de los mensajes SIP, autenticación, autorización y determinación de la dirección de siguiente salto (Next Hop Address).
- *Redirect Server*: provee al cliente SIP la información de la ubicación del siguiente salto para llegar al punto final SIP.
- *Registrar Server*: registran su ubicación en el servidor de registro utilizando sus direcciones SIP asignadas de forma exclusiva, esta dirección SIP puede ser un dominio completo calificado.

SIP se utiliza para establecer llamadas VoIP utilizando las redes de acceso. En las interfaces *E-UTRAN* (LTE) la señalización SIP se ejecuta como señalización en banda en el plano del usuario, lo que significa que sólo se puede monitorear dentro de los portadores del plano de usuario [26].

Los mensajes más importantes de SIP son:

- *REGISTER*: enlaza una dirección SIP *Uniform Resource Identifier (SIP URI)* a una dirección IP.
- *INVITE*: inicia una sesión SIP. También puede utilizarse para modificar una sesión existente, por ejemplo para agregar o eliminar un flujo de datos.
- *BYE*: finaliza una sesión iniciada con *INVITE*.
- *CANCEL*: cancela una solicitud pendiente, por ejemplo, si se ha respondido a *INVITE* con *200OK*, pero *ACK* final se pierde.
- *OPTIONS*: utilizado por un agente SIP para solicitar una lista de capacidades de otro agente SIP o de un proxy SIP.
- *MESSAGE*: para la mensajería instantánea.

A cambio de invocar un método, la parte SIP receptora devuelve un código de respuesta a la parte de origen. Básicamente estos códigos de respuesta son idénticos a los utilizados en HTTP/1.1.

El código de respuesta más común es *200OK*, que normalmente se envía para confirmar la recepción de un *SIP INVITE*. La Figura 2.34 muestra cómo se configura una sesión SIP entre dos usuarios. Los terminales en este

escenario se denominan agentes de usuario, el término utilizado para un suscriptor SIP. Los proxies SIP tienen que asegurarse de que todos los mensajes SIP se encaminan correctamente. En la arquitectura del EPC, las funciones de proxy SIP pueden encontrarse, por ejemplo, en el IMS.

- Sesion Description Protocol

SIP por sí mismo no proporciona ninguna descripción de formato de medios, ni indicación explícita de QoS. Por esta razón, se utiliza generalmente en combinación con el protocolo de descripción de sesión *SDP* que se utiliza para negociar, por ejemplo, el CODEC de audio de la conexión VoIP. A continuación se incluye un resumen del Protocolo SDP, un mayor detalle de este protocolo se puede encontrar en el documento RFC 2327.

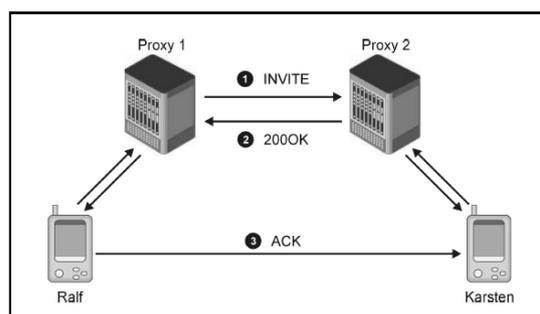


Figura 2.34. Inicio de Sesión SIP

Fuente: [26]

SDP describe parámetros de sesión como direcciones IP, el puerto *Protocolo de Datagramas de Usuario (UDP)*, perfiles RTP y capacidades de conferencia multimedia [30].

Los UA utilizan los siguientes parámetros SDP para proporcionar puertas de enlace de telefonía:

- *Direcciones IP*: del gateway local, el gateway remoto o la dirección de multicast de conferencia de audio usada para el intercambio de paquetes.

- *El Puerto UDP*: indica el puerto de transporte usado para recibir los paquetes desde el gateway remoto.
- *Audio Media*: especifica los medios de audio a usar, incluyendo el CODEC.

- **Real Time Transport Protocol**

Real-time Transport Protocol (RTP) utiliza un encabezado de UDP/IP para proporcionar una marca de tiempo. RTP funciona encima de UDP e IP y se observa comúnmente como *RTP/UDP/IP*. Hasta la fecha, todos los protocolos de señalización VoIP utilizan *RTP/UDP/IP* como mecanismo de transporte para el tráfico de voz (por ejemplo, Microsoft NetMeeting utiliza RTP para llevar comunicaciones de audio y video). A menudo, los flujos de paquetes RTP se conocen como flujos RTP. Esta nomenclatura se utiliza para describir el camino de audio [30].

RTP tiene un campo que marca el tiempo exacto en que se envió el paquete (en relación con todo el flujo RTP). Esta información se conoce como: RTP timestamps (*marcas de tiempo RTP*) y es utilizada por el dispositivo que termina o recibe el flujo de audio. El dispositivo receptor utiliza las marcas de tiempo RTP para determinar cuándo se esperaba un paquete, si el paquete estaba en orden y si se recibió cuando se esperaba. Toda esta información ayuda a la estación receptora a determinar cómo ajustar sus propios parámetros para ocultar cualquier problema potencial de la red, como retraso, jitter y pérdida de paquetes... [30].

2.5.1. Flujo de una llamada de VoIP

Este apartado se enfoca en el flujo de una llamada VoIP usando el protocolo SIP.

Dado que SIP especifica únicamente cómo se crean, modifican y eliminan las sesiones, la funcionalidad adicional es soportada por

otros protocolos IETF. Por ejemplo, SIP utiliza varios protocolos, incluyendo HTTP1.1, protocolo de definición de sesión (SDP), RTP/RTCP, protocolo de configuración dinámica de host (DHCP) y DNS, para realizar otras tareas como búsqueda de nombres de dominio para permitir la movilidad [29].

En la Figura 2.35 se detalla el flujo de una llamada de VoIP usando SIP, de acuerdo a lo estudiado, el proceso es muy simple, SIP se encarga de establecer la sesión, una vez establecida (200 OK y ACK), el protocolo RTP se encarga de la transmisión de datos entre el llamante y el llamado. Para este ejemplo se usa un SIP gateway para llegar a la PSTN.

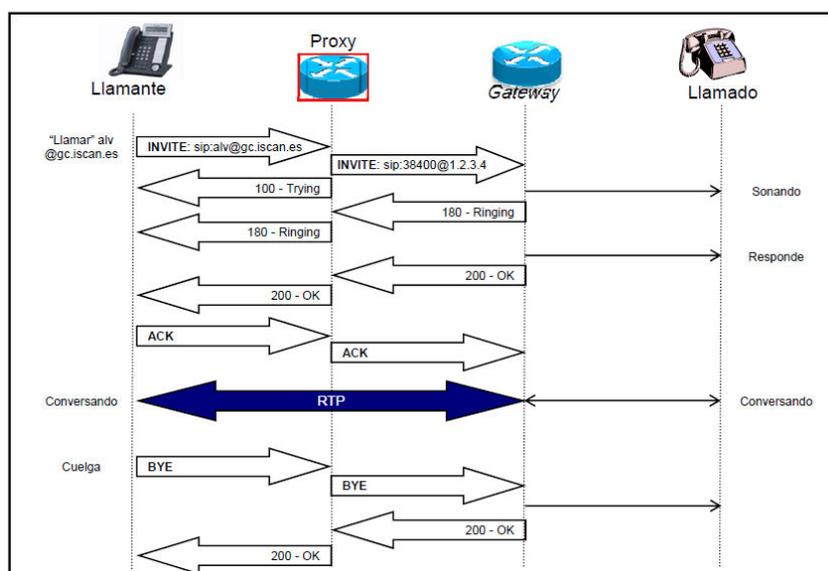


Figura 2.35. Flujo de llamada SIP

Fuente: Transparencias en clase VoIP MET III [32]

2.5.2. Codecs de VoIP

Las redes GSM comenzaron con el CODEC de voz *Full Rate (FR)* y evolucionaron a *Enhanced Full Rate (EFR)*. El CODEC *Adaptable Multi-Rate (AMR)* se añadió a 3GPP Release 98 para GSM para permitir la adaptación de la velocidad de CODEC a las condiciones

de radio. Las tasas de transmisión de AMR oscilan entre 4,75 Kbps y 12,2 Kbps. La tasa de AMR más alta es igual a la EFR. AMR la cual utiliza una frecuencia de muestreo de 8 KHz, que proporciona un ancho de banda de audio de 300-3400 Hz. El mismo CODEC AMR se incluyó también para WCDMA en la versión Release 99 y también se utiliza para ejecutar el servicio de voz en HSPA. El CODEC AMR también se puede utilizar en LTE [27].

El CODEC AMR-WB (Wide Band) utiliza una frecuencia de muestreo de 16 KHz, que proporciona un ancho de banda de audio de 50-7000 Hz y una calidad de voz sustancialmente mejor y una mejor puntuación de MOS. Como la tasa de muestreo de AMR-WB es el doble de la tasa de muestreo de AMR, AMR se refiere a menudo como banda estrecha o *narrow band (AMR-NB)*. Las velocidades de datos AMR-WB oscilan entre 6,6 Kbps y 23,85 Kbps La velocidad típica es 12.65 Kbps, que es similar a la AMR normal de 12.2 Kbps. AMR-WB ofrece claramente mejor calidad de voz que AMR-NB con la misma velocidad de datos y se puede llamar audio de banda ancha con transmisión de radio de banda estrecha. El ancho de banda de radio se ilustra en la Figura 2.36 y el ancho de banda de audio en la Figura 2.37 [27].

Las velocidades de bits más pequeñas: 1,8 y 1,75 Kbps, se utilizan para la transmisión de marcos indicadores de silencio (SID).

Cuando la llamada es fuera de las redes móviles, la transcodificación de voz suele requerirse con modulación de código de pulsos *Pulse Code Modulation (PCM)* de 64 Kbps en enlaces que utilizan la codificación UIT G.711. Para las llamadas de UE a UE, la transcodificación puede omitirse con operación sin transcodificador o también llamada *tandren free*. La transcodificación generalmente degrada la calidad de la voz y no es deseable dentro de la red.

AMR-NB	AMR-WB
12.2 kbps	23.85 kbps
10.2 kbps	19.85 kbps
7.95 kbps	18.25 kbps
7.4 kbps	15.85 kbps
6.7 kbps	14.25 kbps
5.9 kbps	12.65 kbps
5.15 kbps	8.85 kbps
4.75 kbps	6.6 kbps
1.8 kbps	1.75 kbps

Figura 2.36. Codecs AMR
Fuente: [27]

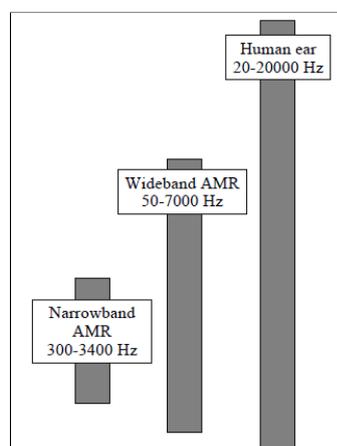


Figura 2.37. Ancho de banda de Audio para CODEC AMR
Fuente: [27]

También hay una serie de CODEC de voz que se utilizan generalmente para VoIP. Algunos ejemplos son G.729, usando una velocidad de codificación de 8 Kbps, y el *Internet Low Bit Rate Codec (iLBC)*, de 13 Kbps que se usa, en Skype y en Googletalk.

En la Figura 2.38 se detalla un resumen de los CODEC, con sus respectivas tasas y latencias.

ITU spec.	Rate (kHz)	Bit rate (kbit/s)	Latency (ms)
G.711	8	64	0.125
G.722	16	64	4
G.722.1	16	24,32	40
G.722.1C	32	24,32,48	40
G.723	8	24	
G723.1	8	5.3, 6.3	37.5
G726	8	16, 24, 32, 40	
G.729	8	6.4	
GSM FR	8	13	30
GSM HR	8	5.6	25
GSM AMR	8	4.75, 5.15, 5.9, 6.7, 7.4, 7.95, 10.2, 12.2	25
Speex	8,16,32,48	2.15 to 44.2	30

Figura 2.38. Descripción de los Códec de Voz más populares
Fuente: [27]

2.6. Limitaciones de LTE para VoIP

Las limitaciones de la red LTE en general abarcan un campo de estudio completo y pueden ser tema de futuras investigaciones y desarrollos de temas de grado. Específicamente las limitaciones de LTE para VoIP estarían relacionadas principalmente a cobertura y calidad de señal LTE, este tema se trata en el análisis de los resultados obtenidos durante la evaluación de los métodos propuestos. Luego de definir cobertura y calidad de señal como principales limitantes de LTE para VoIP, existirían también limitaciones de capacidad debido al número de usuarios simultáneos utilizando el servicio, es decir que existiría una limitante de acceso.

Debido a que hasta la actualidad todavía no se consigue una gran penetración de los usuarios en las redes LTE, no se puede estimar en realidad cual sería la limitante de la red. Para las redes UMTS las limitantes de capacidad se tratan de resolver con la inclusión de nuevas portadoras, siempre y cuando exista suficiente espectro radio eléctrico disponible para la operadora. Adicionalmente se trata de desplegar un mayor número de radiobases que tengan una zona de cobertura reducida (HotSpots) y con esto aumentar la capacidad en zonas específicas.

Las redes LTE son totalmente compatibles con HotSpots y portadoras adicionales que en un futuro solventarían las limitantes de capacidad, junto

con nuevas soluciones como *LTE Carrier Aggregation (LTE CA)*, disponible en LTE Advance. En conclusión dado que existe suficiente capacidad disponible, la principal limitante para VoIP en LTE no se debe al estándar de operación, y más bien la principal limitante sería la cobertura, ya que por el momento se ha masificado su uso únicamente en ciudades principales y únicamente en las bandas de 1900Mhz para Movistar y 2100Mhz para Claro y CNT.

De todos estos limitantes, nosotros estamos interesados en analizar los métodos de medida de parámetros de QoS y de medirlos en la Ciudad de Guayaquil, para obtener medidas reales del impacto de los parámetros de QoS en la VoIP. La complejidad asociada con la medida de estos parámetros nos ha llevado a no considerar la medida explícita de parámetros de QoE. En su lugar, partimos de la base que si se produce una degradación de la medida de los parámetros de QoS es muy probable que la QoE experimentara una consecuente degradación.

CAPÍTULO 3

3. MODELO PROPUESTO Y DISEÑO DE EXPERIMENTOS

En este capítulo se detallan los modelos propuestos para evaluar el servicio de VoIP en redes LTE, así mismo se incluye el proceso para obtener el modelo funcional, es decir, se detalla paso a paso el procedimiento realizado para poner en práctica el modelo propuesto.

3.1. Modelo propuesto para la solución del problema

Debido a la flexibilidad de las telecomunicaciones en la actualidad, se podrían plantear muchos métodos diferentes para las mediciones de LTE y de VoIP, basados solo en LTE, en trazas del operador de servicios, basado en aplicaciones de servicios VoIP existentes como Skype, WhatsApp, en consulta de estadísticas de red, basados en quejas de usuarios VIP... Para el caso de esta investigación, es deseable medir los parámetros reales a los que está expuesto el dispositivo móvil y verificar el comportamiento del servidor de VoIP: con esta información, tendríamos un mayor rango de análisis y la capacidad de poder crear correlaciones. Por lo tanto el modelo de medición propuesto trata de brindar mayor flexibilidad de análisis en cuando a Redes IP y Redes LTE y se basa en lo siguiente:

- Dispositivo móvil conectado a la red LTE.
- Programa SoftPhone instalado en dispositivo móvil, para uso de VoIP
- Vehículo Computador y GPS.
- Servidor VoIP configurable por usuario.

Como observaciones y recomendaciones para cada punto se tiene lo siguiente:

- Para el punto 1 y 2 se recomienda usar un modelo de teléfono de gama alta, que soporte la instalación de software SoftPhone, además se

recomienda que soporte el bloqueo por Tecnología RAT, para poder fijar las pruebas en LTE.

- Para el SoftPhone, se recomienda Zoiper por su fácil configuración y su versatilidad.
- Se recomienda un computador de gama media-alta que soporte la instalación y operación de software de medición-recolección de datos.
- Para el Servidor IP, se recomienda usar directamente Asterisk sobre un servidor Linux, en el caso de este trabajo se usó la distribución CentOS por ser orientada a servidor.

Para el desarrollo de esta investigación no se utilizó una dirección de IP pública, por tal motivo el servidor IP no es alcanzable desde el Internet. Para solucionar este inconveniente se le agregó un ítem adicional a nuestro modelo: El uso de una VPN.

3.1.1. Diagrama esquemático del modelo de pruebas

En la figura 3.1 se detalla gráficamente el modelo de esquemático de las pruebas a realizar, con cada uno de sus componentes.

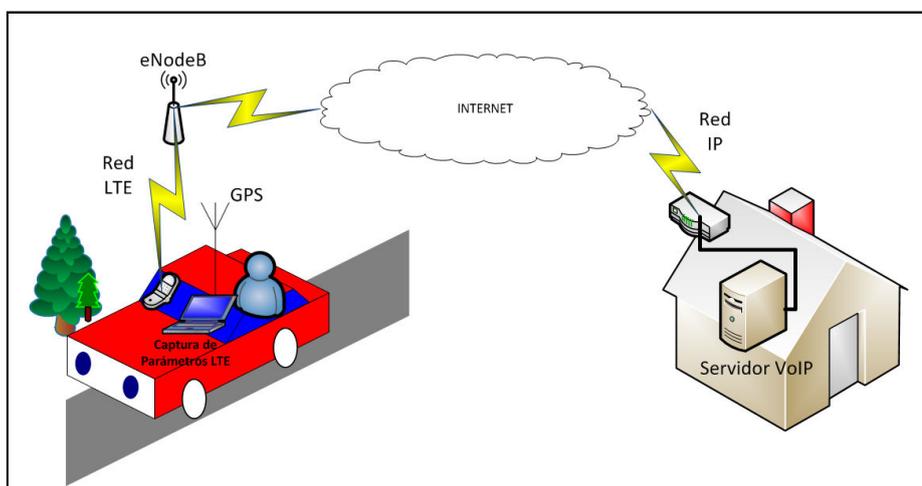


Figura 3.1. Modelo de pruebas

Una vez definido el modelo de pruebas, se evalúan los diferentes métodos para medir la QoS de VoIP en la red LTE. Es decir, que

usamos este modelo propuesto para evaluar de diferentes maneras VoIP sobre LTE. El requisito necesario para que este modelo funcione, es tener conectividad desde el dispositivo móvil en la red LTE hasta el servidor VoIP.

3.1.2. Descripción detallada del modelo a utilizar

El modelo propuesto tiene como objetivo capturar la mayor cantidad de información de las redes IP, las redes LTE, el posicionamiento en la ciudad con GPS, y de esta manera tener la suficiente información para realizar el análisis y las correlaciones respectivas. A continuación se detallan cada uno de los elementos que componen el modelo propuesto.

- Servidor VoIP

Se elige un computador casero con características de hardware normales, no se incluye ningún elemento especial. Este detalle de puede encontrar en la Tabla 6.

Marca/Modelo	Genérico Mainboard INTEL
Procesador	Intel Core 2 DUO CPU E7500 @ 2.93 GHz
Memoria	2Gb
Disco Duro	300 Gb.

Tabla 6. Características de Hardware Servidor VoIP

Se elige la distribución CentOS 7 como sistema operativo del Servidor. Adicionalmente y como detalle importante, se escoge el método de instalación del sistema operativo en una memoria flash USB. Las características del dispositivo de memoria USB se detallan en la Tabla 7.

Marca/Modelo	Kingston Datatraveler 100 G3
Capacidad	16 Gb.
Velocidad de Transacción	USB 3.0

Tabla 7. Características de Hardware unidad de almacenamiento de S.O.

Las razones para usar una memoria portátil como unidad de almacenamiento y arranque del sistema operativo fueron las siguientes:

- Mantener intacto el sistema operativo original de la computadora de escritorio, y convertirla en un servidor bajo demanda.
- Capacidad de manejar un servidor portátil, el cual puede iniciar en cualquier computadora con arranque de Sistema Operativo por USB.
- Ganar funcionalidades que no se tendrían al usar una máquina virtual, como por ejemplo manejar todos los dispositivos del computador, las interfaces de red...

La desventaja de usar este método de instalación es la velocidad de transacción de datos entre procesador y la unidad de almacenamiento, lo que en ocasiones causa retrasos o mayor tiempo para completar una tarea.

Para la central telefónica de VoIP, se usó la última versión de Asterisk que se pudo encontrar en el repositorio de Software Linux. La versión usada durante las pruebas fue: Asterisk 13.11.2, la cual se muestra en la Figura 3.2 una vez que se ingresa al servicio de Asterisk en la consola de Linux.

La red de acceso a Internet, por cable telefónico DSLAN, usa direccionamiento IPv6. Debido a las características de esta red, no fue posible tener conectividad desde otras redes hacia el Servidor, por tal motivo necesitamos una herramienta adicional para la interconexión, por lo tanto se escogió una VPN.

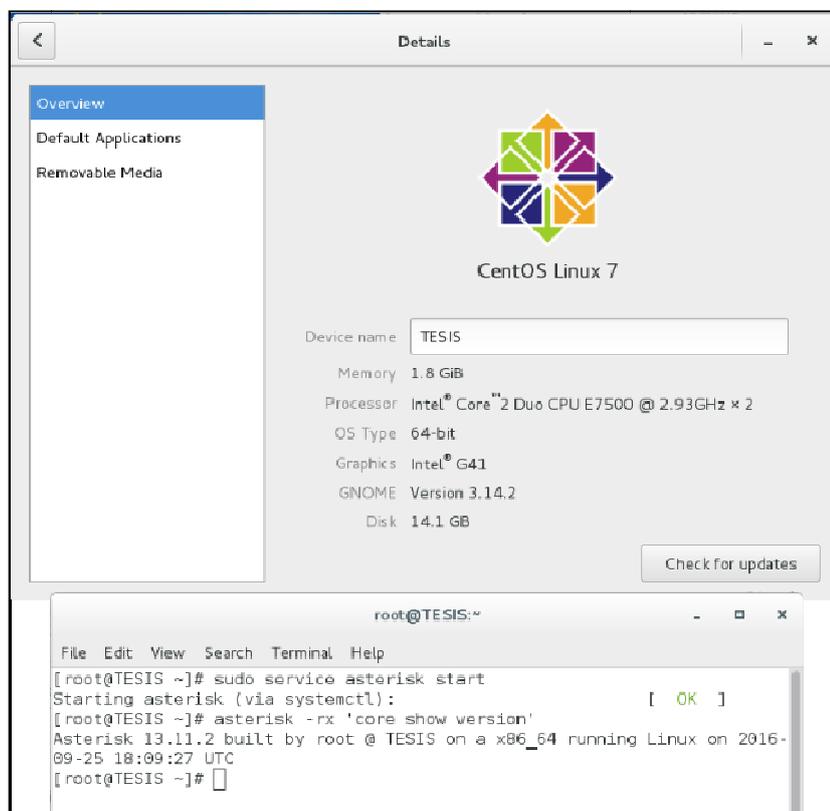


Figura 3.2. Sistema Operativo y Versión de Asterisk

- VPN

Se elige una VPN para interconectar el servidor con el dispositivo móvil o con cualquier otro dispositivo que pueda conectarse a una VPN. Se eligió el proveedor HAMACHI el cual nos da la posibilidad de crear una VPN LAN Virtual y así tener conectividad con nuestros dispositivos. El dispositivo móvil también fue conectado a la VPN de HAMACHI usando las facilidades del sistema operativo Android.

El principal motivo para elegir HAMACHI como VPN es su flexibilidad en diversos sistemas operativos: Linux, Windows, Android... y la facilidad que ofrece para crear una VPN. En la Figura

3.3 se muestra la configuración de la VPN por línea de comandos en el servidor.

```

root@TESIS:~
File Edit View Search Terminal Help
[root@TESIS ~]# hamachi
version   : 2.1.0.165
pid       : 1536
status    : logged in
client id : 205-565-272
address   : 25.93.6.34 2620:9b::195d:622
nickname  : TESIS
lmi account: wrendon2986@yahoo.es
[root@TESIS ~]# █

```

Figura 3.3. Red VPN HAMACHI en LINUX

Marca/Modelo	LG G4 H815
Memoria RAM /Memoria Interna	3GB LPDDR3 /32GB
CPU Procesador /Núcleos	Hexa-Core , 2 procesadores: 1.8Ghz Dual-Core ARM Cortex-A57 1.4Ghz Quad-Core ARM Cortex-A53
Arquitectura - Chipset	64bits - Qualcomm Snapdragon 808 MSM8992 (20nm)

Tabla 8. Características del dispositivo móvil

Marca/Modelo	LENOVO/T430
Procesador	Intel Core i5 3320M CPU @ 2.60 GHz
Memoria	4Gb
Disco Duro	450 Gb.
Sistema Operativo	Windows 7 - 32 Bits

Tabla 9. Características de Hardware Computador Portátil

- Dispositivo móvil

Se elige un Smartphone de última generación para las pruebas, en la Tabla 8 se detallan sus características del mismo.

La ventaja de este dispositivo móvil es la posibilidad de bloqueo por tecnología RAT, esto significa que para las de VoIP únicamente se considera la cobertura LTE y no las otras tecnologías, como normalmente ocurriría en un dispositivo cualquiera. Este detalle nos permite evaluar el comportamiento de la llamada de VoIP en diferentes condiciones de cobertura y calidad de radio frecuencia de la red LTE. Es muy importante que el chipset del dispositivo o teléfono móvil sea compatible con la herramienta de medición, para nuestro caso se hizo una investigación previa donde se confirmó que el Chipset Qualcomm es compatible con las herramientas de medición de redes móviles, y que los modelos de Iphone no son compatibles, las herramientas de medición normalmente usadas para verificar las redes móviles son: Accuver X-CAP, TEMS, Genex Probe. En la referencia bibliográfica se incluyen las páginas web de las herramientas, donde se puede verificar el *Chipset* soportado [33].

Finalmente para el proceso de captura de datos de la red LTE se utilizó un computador portátil sus características se detallan en la Tabla 9.

3.2. Implementación de una central telefónica de VoIP

A continuación se detalla paso a paso el proceso de instalación de la central telefónica de VoIP en un sistema operativo Linux.

3.2.1. Instalación de servidor CENTOS

Este es proceso es fundamental para completar el modelo de pruebas, ya que se requiere tener un servidor flexible y que sea capaz de soportar una central telefónica. Además este servidor puede soportar el funcionamiento de programas analizadores de tráfico, en

el desarrollo de este proyecto usamos la versión Wireshark para Linux.

Se elige CentOS como sistema operativo debido a que su distribución se ha generalizado para servidores y por ser estable, debido a esto, resulta más fácil encontrar software compatible en los repositorios de Linux. El proceso de instalación se resume en los siguientes pasos:

1. Obtener la Imagen del sistema operativo en la página oficial, la cual se incluye en la referencia de este documento [34]. La imagen *International Organization for Standardization (ISO)* DVD es suficiente para un servidor VoIP la cual incluye una interfaz de escritorio. Si bien la versión mínima también es apta para instalar el servidor de VoIP, esta es recomendada para usuarios avanzados, debido a que no posee interfaz gráfica.
2. Una vez descargada la imagen ISO, se recomienda grabarla en un DVD en blanco con capacidad estándar de 4.7 Gb.
3. Proceder con la instalación, para este caso usamos una unidad de almacenamiento portátil o memoria USB como unidad de almacenamiento del Sistema Operativo
4. Para proceder a la instalación el proceso es de manera gráfica y es muy amigable, se siguen los pasos intuitivamente, solo se debe tomar en cuenta la ubicación del sistema operativo en la unidad de almacenamiento externo. En el siguiente enlace se puede encontrar el proceso de instalación paso a paso con Screenshots en la dirección de la página web incluida en la referencia [35].

3.2.2. Instalación de Asterisk

Una vez instalado el servidor Linux, se procede con la instalación del servidor VoIP de Asterisk. Se debe tener en cuenta que no basta con instalar el software de Asterisk para tener un servidor VoIP operativo, adicionalmente se deben configurar las reglas del Firewall del

Servidor, las tablas de caminos... a continuación el detalle paso a paso de la instalación [36].

Primer Paso: Actualizar paquetes

Deshabilitar SELinux, verificar el archivo: `/etc/selinux/config` y verificar el campo: `SELINUX=disabled`. Actualizar los paquetes: Abrir un terminal de Linux y ejecutar: `sudo yum update`. Reiniciar el equipo: `reboot`.

Segundo Paso: Configurar Iptables

En caso de ser un servidor nuevo deben configurarse las reglas del Firewall, en caso contrario, se deben mantener las políticas de seguridad de su servidor. Verificar las reglas actuales del Firewall: `sudo iptables -L`.

Este procedimiento debe mostrar tablas sin ninguna política configurada, ejemplo:

```
Chain INPUT (policy ACCEPT)
target prot opt source destination
```

```
Chain FORWARD (policy ACCEPT)
target prot opt source destination
```

```
Chain OUTPUT (policy ACCEPT)
target prot opt source destination
```

Crear el siguiente archivo usando su editor de texto preferido, este sería usado por el firewall (camino: `/etc/iptables.firewall.rules`):

```
*filter

# Allow all loopback (lo0) traffic and drop all traffic to
# 127/8 that doesn't use lo0
-A INPUT -i lo -j ACCEPT
-A INPUT -d 127.0.0.0/8 -j REJECT

# Accept all established inbound connections
-A INPUT -m state --state ESTABLISHED,RELATED -j ACCEPT
```

```

# Allow all outbound traffic - you can modify this to only
allow certain traffic
-A OUTPUT -j ACCEPT

# Allow SSH connections
#
# The -dport number should be the same port number you set in
sshd_config, ie 8050
#
-A INPUT -p tcp -m state --state NEW --dport 22 -j ACCEPT

# SIP on UDP port 5060, 5061 for secure signaling. Used for
signals such as "hang up"
-A INPUT -p udp -m udp --dport 5060 -j ACCEPT
-A INPUT -p udp -m udp --dport 5061 -j ACCEPT

# IAX2- the IAX protocol - comment out if you don't plan to use
IAX
# -A INPUT -p udp -m udp --dport 4569 -j ACCEPT

# IAX - old IAX protocol, uncomment if needed for legacy
systems.
# -A INPUT -p udp -m udp --dport 5036 -j ACCEPT

# RTP - the media stream - you can change this in
/etc/asterisk/rtp.conf
-A INPUT -p udp -m udp --dport 10000:20000 -j ACCEPT

# MGCP - if you use media gateway control protocol in your
configuration
-A INPUT -p udp -m udp --dport 2727 -j ACCEPT

# Uncomment these lines if you plan to use FreePBX to manage
Asterisk
# -A INPUT -p tcp --dport 80 -j ACCEPT
# -A INPUT -p tcp --dport 443 -j ACCEPT

# Allow ping
-A INPUT -p icmp --icmp-type echo-request -j ACCEPT

# Log iptables denied calls
-A INPUT -m limit --limit 5/min -j LOG --log-prefix "iptables
denied: " --log-level 7

# Drop all other inbound - default deny unless explicitly
allowed policy
-A INPUT -j DROP
-A FORWARD -j DROP

COMMIT

```

Tercer Paso: Iniciar el Firewall durante el arranque del S.O.

Instalar y habilitar el servicio: `iptables-services` durante el arranque:

```
sudo yum install -y iptables-services
sudo systemctl enable iptables
sudo systemctl start iptables
```

Cargar las reglas del Firewall:

```
sudo iptables-restore <
/etc/iptables.firewall.rules
```

Verificar las políticas del Firewall:

```
sudo iptables -L
```

Guardar las políticas:

```
/usr/libexec/iptables/iptables.init save
```

Cuarto Paso: Instalar dependencias

Este cuarto paso es opcional, en caso de necesitar dependencias adicionales como DHADl, se recomienda verificar la fuente. Para el desarrollo de este proyecto no se necesitaron dependencias adicionales.

Quinto Paso: Instalar Asterisk

Cambiar al directorio Build: `cd ~/build`. Descargar la última versión de Asterisk 13:

```
wget
http://downloads.asterisk.org/pub/telephony/asterisk/asterisk-13-current.tar.gz
```

Descomprimir el archivo: `tar -zxvf asterisk-13-current.tar.gz`. Cambiar el directorio activo por el de asterisk,

según sea la versión descargada, durante el desarrollo de este proyecto la versión utilizada fue 13.11.2: `cd asterisk-13.11.2`.

Habilitar Soporte de MP3, instalar sub versión: `sudo yum install svn`. Ejecutar: `contrib/scripts/get_mp3_source.sh`.

Configurar y construir Asterisk ejecutando el comando `configure` el programa se compila: `./configure --libdir=/usr/lib64`. Si existe alguna dependencia faltante, esta debe de instalarse. Comenzar el proceso de instalación del programa seleccionando las características a instalarse: `make menuselect`. Al ejecutar este comando se desplegará un menú con las opciones, luego de seleccionar las opciones necesarias presione **F12** para salir.

Compilar Asterisk: `make`. Instalar Asterisk en el sistema: `sudo make install`. Instalar archivos de configuración de ejemplo (Sample Files): `sudo make samples`. Configure Asterisk para que inicie automáticamente en caso de reinicio de Sistema Operativo: `sudo make config`. Luego de todo este procedimiento, si no existieron problemas durante la instalación el servidor Asterisk estaría completamente instalado y listo para funcionar.

Para iniciar el servicio del servidor VoIP y verificar su estatus:

Inicio de Asterisk: `sudo service asterisk start`. Consola de Asterisk: `asterisk -rvvv`. Lista de comandos a usar: `core show help`. Desconectar de la consola (aunque se desconecte de la consola, Asterisk seguiría ejecutándose en segundo plano): `exit`.

3.2.3. Implementación de servicios de VoIP con salida a Internet

En este apartado se detalla la configuración realizada para montar el servidor de VoIP en Internet.

Una vez ejecutadas todas las órdenes descritas en el apartado anterior, nuestro servidor está listo para ser usado, al configurar un usuario SIP en Asterisk y en el SoftPhone, si los dos dispositivos están en la misma red LAN y se puede alcanzar el Servidor mediante

el envío de paquetes de *Internet Control Message Protocol* (ICMP) usando ping, podemos realizar llamadas y pruebas locales.

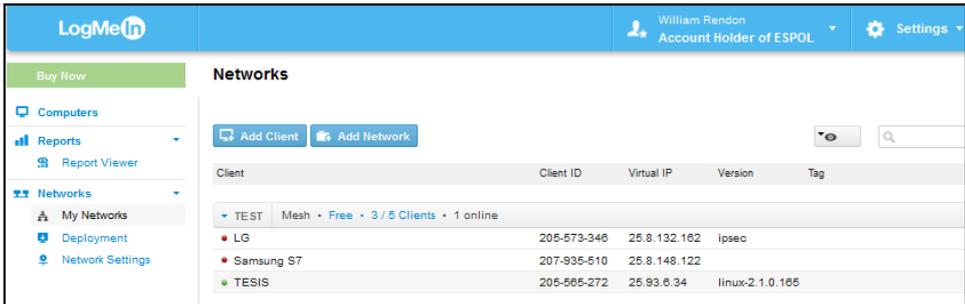
Podemos verificar la dirección IP del servidor Linux mediante el siguiente comando: `ifconfig`, y usar esta configuración como dirección de servidor SIP en el SoftPhone. Aquí el problema radica en que para estas pruebas no se tiene una IP pública disponible. Como se describió en el apartado 3.1.1 el servidor VoIP es un computador de casa y la conexión utilizada es a través de Internet sobre cable telefónico. Se desconoce la configuración de la red de la compañía telefónica, la existencia de encaminadores, firewalls... Al usar las herramientas de Internet disponibles para verificar la dirección IP, se obtiene que dirección Ipv6 fue: `2800:4f0:8f:43b0::3` sin embargo no se puede obtener mayor información sobre la red. Por lo tanto luego de varios intentos fallidos, se encontró como solución el uso de una VPN debido a su flexibilidad con los sistemas operativos utilizados. A continuación se adjunta la configuración de VPN Hamachi en Linux, usando sistema operativo CentOS 7 [37].

Usar el terminal de CentOS para descargar el software de Hamachi:
`wget http://www.vpn.net/installers/logmein-hamachi-2.1.0.165-1.x86_4.rpm`. El paquete de instalación se descarga en el directorio actual. Luego de completarse la descarga, se instala el paquete usando la siguiente orden: `sudo yum install logmein-hamachi-2.1.0.165-1.x86_4.rpm`. Luego de instalado el software se debe conectar con el cliente, es decir con el usuario y la contraseña que usted defina al crear su cuenta Hamachi. Ejecutar:

```
hamachi login
sudo hamachi attach correo@ejemplo.com
```

Para verificar el estatus de su conexión simplemente use el comando `hamachi`. Si se ha completado correctamente el proceso su estatus será: *logged in*, se muestra su *ID* y su *IP* de VPN. En la Figura 3.4 se muestra el detalle de todos los dispositivos que están conectados a la VPN que hemos configurado. La arquitectura de VPN utilizada es de tipo Mesh o Malla, es decir que existe comunicación entre todos los dispositivos. Debido a que el software de Hamachi es propietario, existe la limitante de 5 dispositivos conectados simultáneamente a la misma VPN, pero para el modelo de pruebas que se plantea en este proyecto, es suficiente el uso de dos dispositivos:

- *Cliente*: teléfono móvil conectado a la red LTE.
- *Servidor*: servidor VoIP Asterisk conectado a Internet.



Client	Client ID	Virtual IP	Version	Tag
TEST	Mesh • Free • 3 / 5 Clients • 1 online			
LG	205-573-346	25.8.132.182	ipsec	
Samsung S7	207-935-510	25.8.148.122		
TESIS	205-565-272	25.93.8.34	linux-2.1.0.165	

Figura 3.4. Estatus de dispositivos conectados en la VPN

Una vez completada esta configuración incluyendo la VPN, el modelo está listo para realizar las pruebas hacia el servidor VoIP no solo desde la Red LTE, sino desde cualquier punto de Internet.

3.2.4. Instalación de cliente de VoIP en teléfono móvil que soporta 4G

Este apartado se divide en dos partes, la primera es la configuración de la aplicación SoftPhone en el dispositivo móvil y la segunda es la configuración de la conexión VPN para poder establecer la comunicación hasta el servidor.

Comenzamos descargando de GooglePlay la app Zoiper, una vez instalado, crearemos una nueva cuenta SIP de la siguiente manera:

Ajustes – Cuentas – Agregar Cuenta

La configuración mínima necesaria se detalla en la Figura 3.5 y es la siguiente:

Nombre de la Cuenta: Para ser identificada en Zoiper; *Host:* Dirección del servidor VoIP; *Nombre de Usuario:* Debe coincidir con el usuario SIP creado en el servidor VoIP; *Clave:* Clave del usuario que debe coincidir con la clave creada en el servidor VoIP.

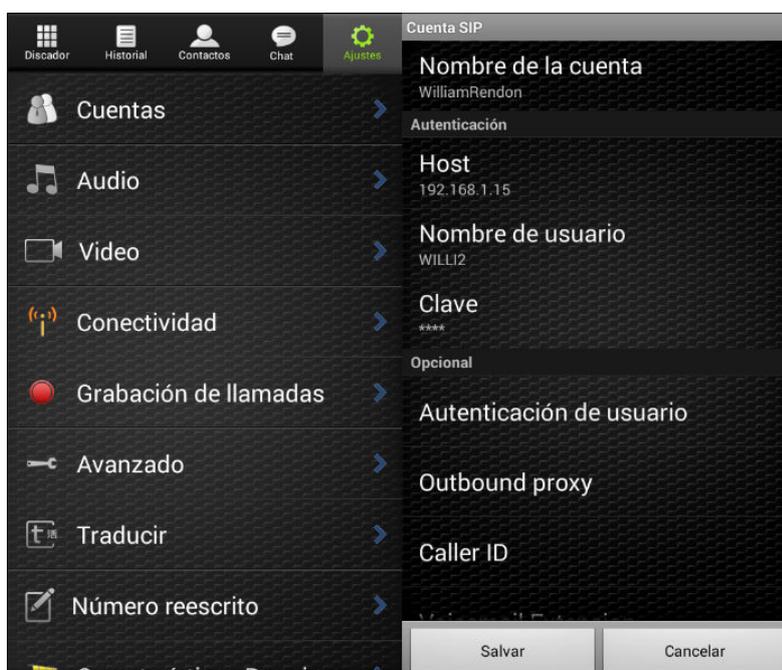


Figura 3.5. Configuración de Nueva Cuenta SIP en Zoiper

Una vez finalizada esta configuración nuestra cuenta SIP y nuestro servidor VoIP están sincronizados, se confirma esto en el programa Zoiper con un visto en color verde. Se debe recordar que los usuarios SIP deben ser configurados en el Servidor VoIP.

En el servidor VoIP puede verificar el estado de los Usuarios de VoIP conectados usando el siguiente comando en la consola de Asterisk: `sip show peers`.

Para la segunda parte de la configuración se debe establecer la comunicación con la VPN de Hamachi, para esto el Software nos da la posibilidad de crear un certificado IPsec e instalarlo en nuestro dispositivo móvil.

Una vez instalado se realiza la configuración mostrada en la Figura 3.6 luego de la cual la VPN está lista para usarse.

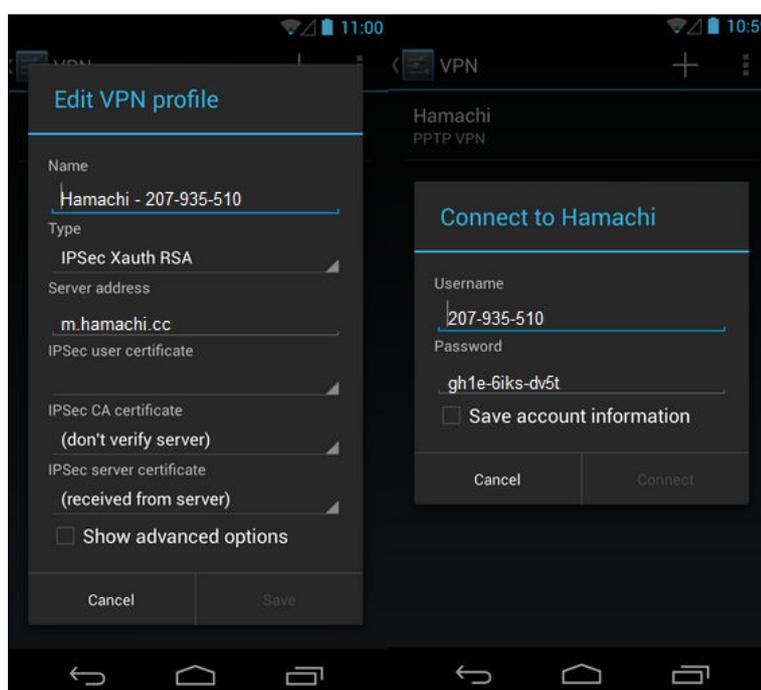


Figura 3.6. Configuración de VPN en dispositivo móvil

Un método para verificar la conexión entre servidor y usuario final, es usar el programa Ping en Linux hacia la IP de la VPN del dispositivo móvil.

Una vez confirmada la comunicación entre móvil y servidor VoIP continuamos con la configuración del modelo de pruebas descrito en la sección 3.1.1 y en la Figura 3.1.

3.2.5. Evaluación de servicio VoIP

Al tener configurado el servidor y el usuario VoIP en la red LTE, ya podemos evaluar el servicio en las diferentes zonas de Guayaquil, para lo cual se deben diseñar los métodos o experimentos a utilizar y así poder evaluar los resultados, según los objetivos de esta investigación.

Para evaluar el servicio VoIP el diseño del experimento incluye la captura de toda la información IP en el servidor. Básicamente para analizar la calidad del servicio VoIP se muestran todas las herramientas disponibles en Wireshark.

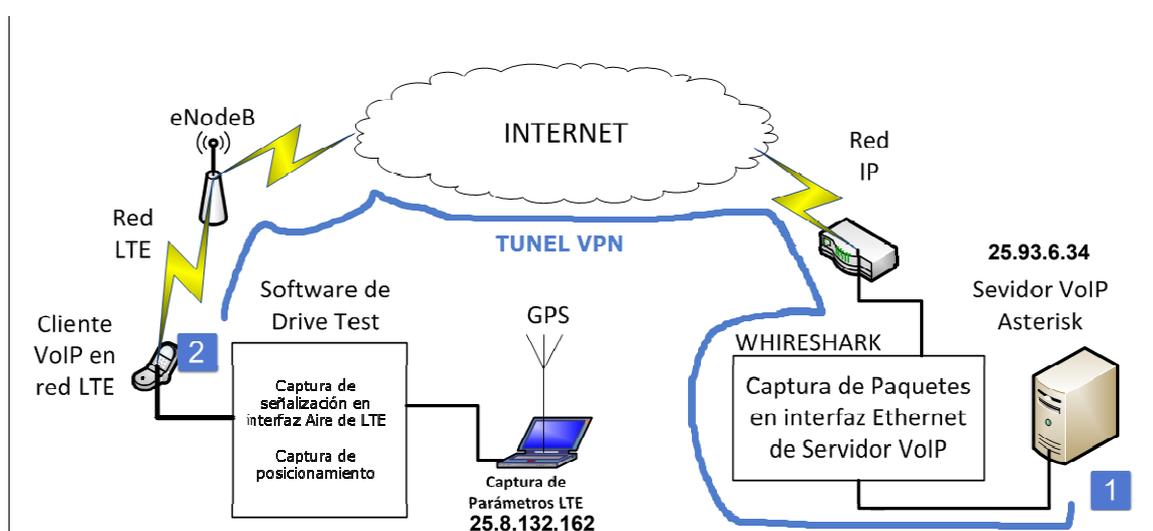


Figura 3.7. Puntos de captura de información

3.3. Diseño de experimentos

En la Figura 3.7 se muestran los puntos de medición o captura de datos en el modelo propuesto, en base a los mismos se realiza el análisis.

- Punto 1: se captura toda la información IP del servidor VoIP en el puerto Ethernet.
- Punto 2: se captura toda la información de la red LTE (E-UTRAN).

3.3.1. Herramientas a utilizar

A continuación se resume las herramientas a usar para el desarrollo de este proyecto:

- *Servidor*: donde se encuentra instalado Asterisk como servidor VoIP y donde se almacena la información capturada con el Wireshark.
- *Computador portátil*: se encarga de almacenar toda la información de la red LTE capturada durante las pruebas móviles.
- *Automóvil*: transporta el equipo de medición siguiendo los caminos o áreas de medición establecidas en el método usado para evaluar la red.

3.3.2. Software a utilizar

A continuación se incluye un breve detalle de los programas utilizados durante el desarrollo de este proyecto:

- *Wireshark*: captura toda la información de red IP, y el proceso de las llamadas de VoIP. Es la herramienta a utilizar para el análisis de la QoS.
- *Accuver Xcal*: software de Drive Test, utilizado para evaluación de redes móviles 2G, 3G y 4G. Es la herramienta a utilizar para el análisis de los parámetros de DT.
- *Microsoft Excel*: herramienta de cálculo y análisis numérico, a ser utilizada para el procesamiento y el análisis de la información capturada durante las pruebas realizadas.

- *MapInfo*: software de procesamiento de información Geográfica, útil para crear y graficar mapas de caminos y para procesar información capturada, así mismo nos ayuda a generar figuras o mapas ge referenciados de la información obtenida durante las pruebas.
- *Open Signal*: en su página web muestra la cobertura y el desempeño de todas las redes a nivel mundial. Para el desarrollo de este proyecto es de mucha utilidad comprar los datos obtenidos durante las pruebas de campo con fuentes de información confiables. OpenSignal también posee su aplicación móvil para realizar pruebas de desempeño y evaluar la cobertura de las redes móviles a las cuales está conectado el dispositivo [38].

3.3.3. Diagrama de conexiones

En la Figura 3.8 se incluye un diagrama de conexiones más detallado en el lado del dispositivo móvil, el cual realiza las pruebas de evaluación de servicio de Red LTE.

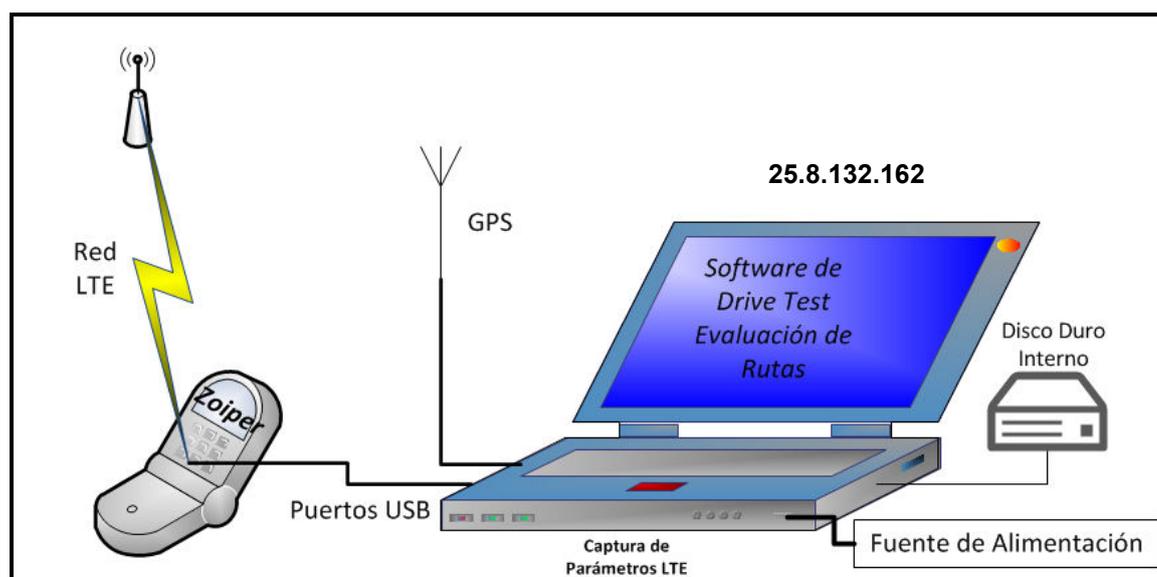


Figura 3.8. Diagrama de conexiones

Luego de las experiencias obtenidas durante la evaluación del servicio, en este punto de evaluación pueden darse dificultades debido a desconexión de equipos, pérdida de camino o de señal GPS, falla en captura de logs... por lo que durante el desarrollo de las mediciones se debe tomar especial atención en la integridad de las conexiones.

3.3.4. Diseño de Experimentos

Basándose en el modelo propuesto en la sección 3.3.1, la Figura 3.1 se procede a diseñar los experimentos, es decir los métodos a ser evaluados durante la captura de información que nos ayuden a verificar la calidad de Servicio VoIP sobre LTE.

- *Primero*: consiste en evaluar la QoS de VoIP usando el modelo propuesto en una zona urbana y geográfica plana, donde se asume una excelente cobertura LTE. Al mismo tiempo se capturan paquetes en el Servidor y se evalúa posibles problemas de calidad de servicio VoIP debido problemas en la Red LTE. Todo esto mientras se realiza una llamada de VoIP hacia otro dispositivo de VoIP en la misma red local del Servidor.
- *Segundo*: se desea evaluar la calidad de servicio de VoIP con el modelo propuesto en las tres principales zonas que se pueden encontrar en la ciudad de Guayaquil: zonas urbanas planas, zonas urbanas elevadas y zonas fuera de la ciudad (se definen las zonas a evaluar en el apartado 2.1.1) y utilizar las aplicaciones de Asterisk record y playback, definidos en la configuración de extensiones, de esta forma no es necesario un interlocutor para realizar las pruebas. Todo esto mientras se captura los paquetes IP en el Servidor.
- *Tercero*: consiste en evaluar la calidad de Servicio de VoIP con el modelo propuesto, en las tres principales zonas que se pueden encontrar en la ciudad de Guayaquil: zonas urbanas planas, zonas

urbanas elevadas y zonas fuera de la ciudad (apartado 2.1.1) y haciendo una llamada directamente al Servidor VoIP. El Servidor VoIP en su configuración de extensiones posee una programación definida el cual utiliza la aplicación de Asterisk: *SayNumber* para traducir de texto a voz los números, en un conteo hasta 1000. El objetivo de este método es detectar cuando el conteo no es continuo, debido a problemas de QoS, es decir del lado del Usuario VoIP en la Red LTE detecta inmediatamente cuando exista un problema de calidad, variación en el conteo... En el servidor de VoIP se mantiene la captura de paquetes IP durante todas las pruebas de llamadas.

3.3.5. Evaluación de resultados

El proceso de evaluación de resultados consiste en el postproceso de la información recolectada en campo con la herramienta de evaluación de redes móviles y el postproceso de la información recolectada en el servidor mediante el uso de la herramienta Wireshark. Se procede a exportar toda la información relevante a tablas de Excel, para realizar el análisis y las correlaciones.

Se procede a graficar geográficamente la información relevante capturada en campo, con el objetivo de detectar las zonas de análisis.

3.4. Captura de datos de la red LTE mediante dispositivo móvil

En el Mercado de las comunicaciones móviles existen varias empresas especializadas en el desarrollo de software para la evaluación del desempeño de las redes, entre las más conocidas tenemos las siguientes:

- Accuver, con XCAL y XCAP.
- Ericsson con TEMS y NEMO.
- Huawei con Genex Probe y Assistant.

- Commscope (ex Andrew) con Invex e Interpreter.
- Rohde and Schwarz con Romes y SwissQual.
- Amdocs con Actix.

Todos los software descritos son licenciados y debido a la gran demanda de las empresas proveedoras de servicios de comunicaciones, estas licencias son muy costosas y de tiempo limitado. Debido a la masificación a nivel mundial de los trabajos relacionados con la evaluación del servicio de telefonía móvil, el uso de estas herramientas se ha vuelto común para el grupo de ingenieros especializados en radio frecuencia. Por tal motivo se puede encontrar muy fácilmente en páginas de videos como YouTube, información muy detallada de la configuración y uso de estas herramientas. El objetivo de este trabajo es el análisis de los resultados obtenidos, por lo tanto no se incluye un mayor análisis de las herramientas de captura de información de redes móviles.

3.4.1. Configuración de equipos para captura de datos

Para el desarrollo de este proyecto se requiere que el dispositivo móvil sea detectado por el software de pruebas, para esto debemos asegurarnos que el modo de conexión USB del teléfono de pruebas sea DM (Diagnostic Mode), de esta forma se habilitaran los puertos COM y modem del teléfono. Esto debe realizarse en la mayoría de software de evaluación de redes móviles, de esta forma el teléfono estaría habilitado para la captura de datos.

A continuación se muestra un ejemplo de la configuración del modo DM en el teléfono LG. En la pantalla principal de marcación, usar el siguiente código para mostrar el menú oculto:

`*#546368#*815#` (Para LG G4 815), `3845#*855#` (Para LG G3 855)

Usar el siguiente método para configurar los puertos DM: `Port Setting -> Diag Setting -> USB set for Diag`.

En las Figuras 3.9 y 3.10 se detalla la configuración en el teléfono.

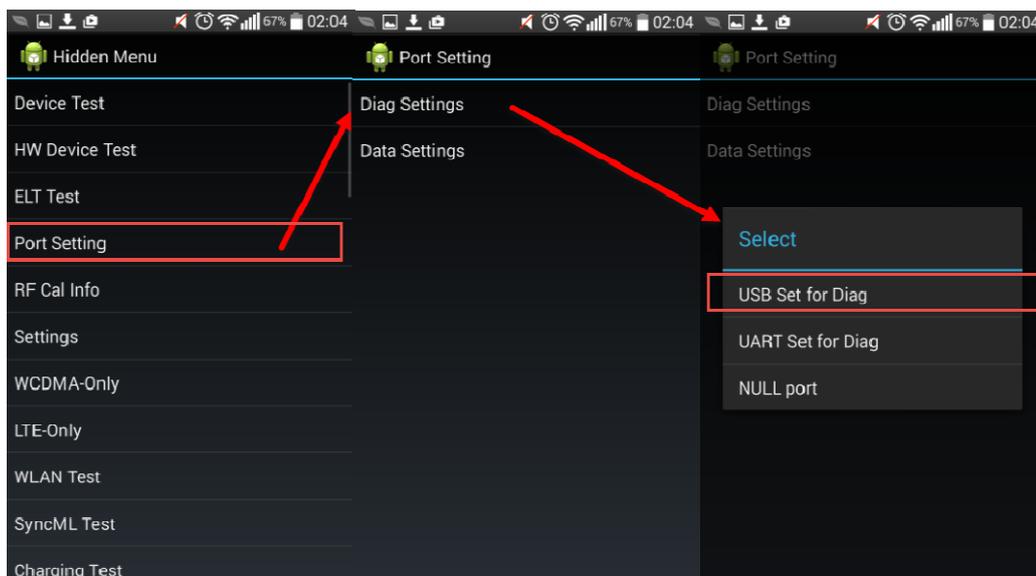


Figura 3.9. Configuración de Puerto USB para DM

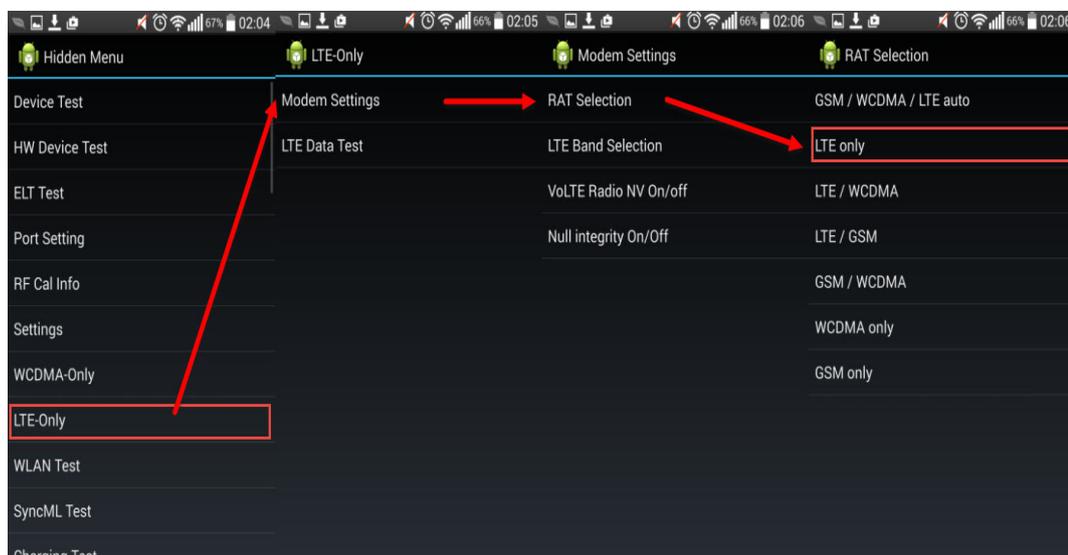


Figura 3.10. Configuración de tecnología RAT

Adicional a las configuraciones antes expuestas, se requiere que el dispositivo móvil permanezca siempre en la red LTE, por tal motivo se debe realizar la siguiente configuración después de ingresar el código para mostrar el menú oculto: `LTE-Only -> Modem Settings -> RAT Selection -> LTE Only`.

3.4.2. Crear caminos y mapas de recorridos para recolección de datos

Una parte importante del método de medición, es definir un camino fija para realizar las pruebas, en otras palabras, se realiza enmarcación y delimitación de la medición. Definir el tipo de camino adecuada para la medición influye directamente en el método de medición, debido a que nos ayuda a enfocarnos en una zona en particular y no en todo el universo de muestras disponibles.

En la industria de Telecomunicaciones comúnmente se usan herramientas de información geográfica GIS, para realizar el proceso de enmarcado y delimitación geográfica, adicionalmente para mantener una base de datos georeferenciada de los nodos de red, ubicar geográficamente puntos de quejas, o zonas de interés... todo esto con el fin de solventar la gran necesidad de estas empresas de manejar su información de red de manera geográfica. Una de las herramientas de mayor aceptación y uso en la industria es MapInfo, debido a su facilidad de uso y a la interoperabilidad con bases de datos, hojas de cálculo, texto CSV, imágenes... Esta herramienta es del tipo licenciada, podemos descargar la versión de prueba por 15 días directo desde su página web [39]. Aunque herramientas como MapInfo son de mucha ayuda para el desarrollo y evaluación de pruebas de campo, nuestra limitante es la licencia de uso, sin embargo todavía podemos hacer uso de herramientas de software libre, para facilitarnos el trabajo, desarrollar y evaluar las pruebas realizadas.

Para nuestro caso, se hace uso de GoogleEarth, versión 7.1.7.2606 para Windows, el cual nos permite definir polígonos y crear caminos

con las herramientas Add Polygon y Add Path, esto se muestra en la Figura 3.11.

Toda la información creada en Google Earth, puede ser exportada en los formatos de google - Keyhole Markup Language (KML) o KMZ (KMZ es la versión comprimida de KML). El análisis y la evaluación de información geográfica pertenecen a un amplio campo de estudio: Ciencias geográficas, ordenación de territorio, Ingeniería Civil...

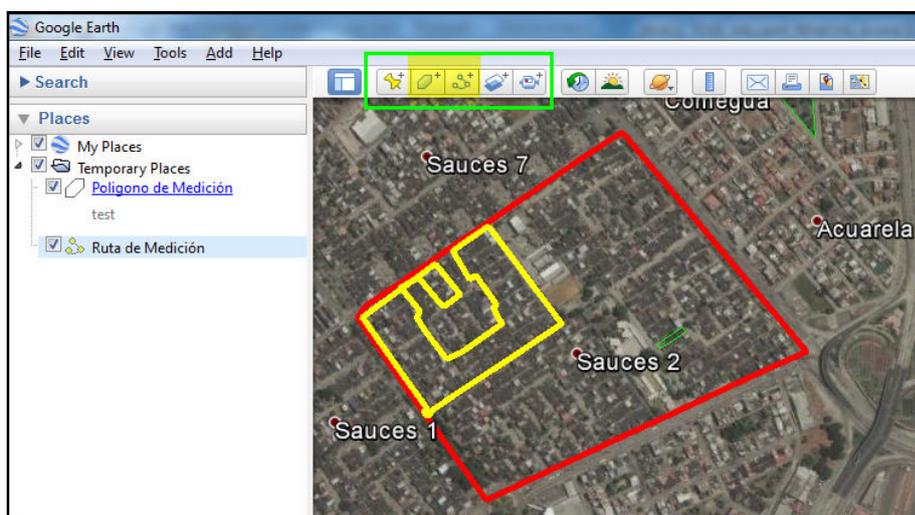


Figura 3.11. Definición de polígono y camino de evaluación

3.5. Métricas

A continuación se detallan los resultados de las métricas obtenidas durante la evaluación del método y la captura de información.

3.5.1. Métricas en LTE

A continuación se muestran los datos capturados desde el dispositivo móvil LTE. Los datos obtenidos son procesados y mostrados con la ayuda de las herramientas de Excel y MapInfo. Las Figuras que se muestran en las siguientes secciones son un compilado de todos los métodos de medición.

- **Potencia de señal recibida**

En la Figura 3.12 se muestra el resultado de la cobertura en enlace descendente LTE en todas las zonas evaluadas.

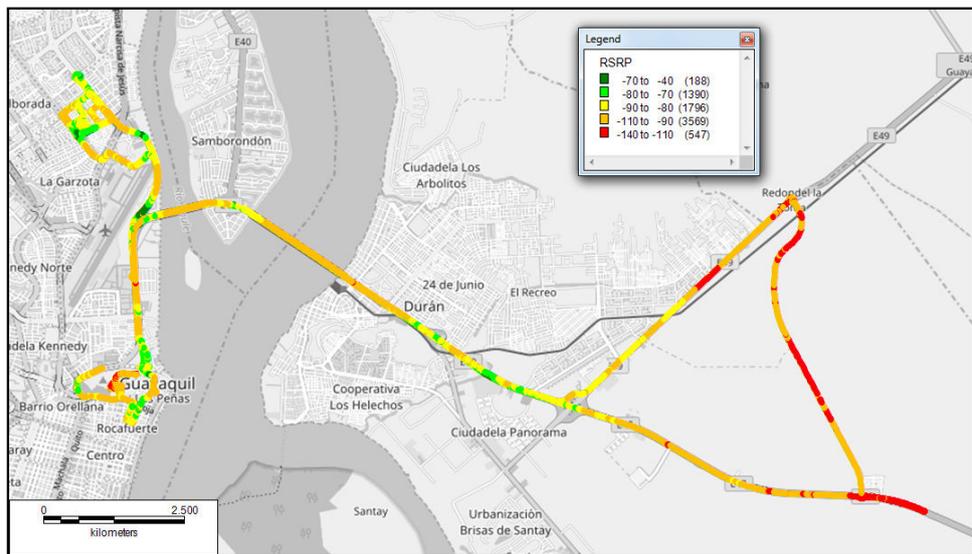


Figura 3.12. Potencia de señal recibida

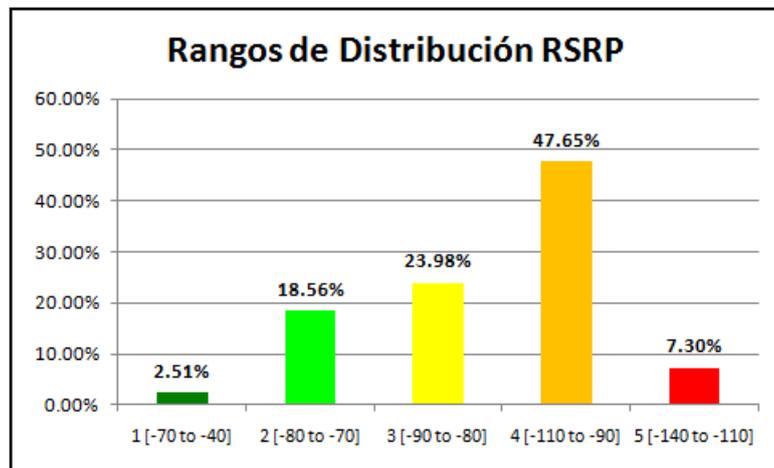


Figura 3.13. Distribución de Potencia recibida

De lo revisado teóricamente el RSRP se encuentra entre los rangos de -140 dBm como nivel mínimo de potencia recibida y hasta -40 dBm como máximo.

Por lo tanto, escogieron 5 rangos simétricos mostrados en la Figura 3.13, donde se puede observar que el mayor porcentaje de muestras se encuentra en el rango de -110 a -90 dBm.

Se pretende evaluar la calidad y experiencia de usuario en las zonas para rangos de RSRP de -140 a -110 dBm.

- **Calidad de señal**

En la Figura 3.14 se muestra la calidad de señal obtenida durante las pruebas.

Durante todos los recorridos se observa calidad de señal muy buena, es decir, 89.19% de las muestras entran en el rango de -10 a 0 dB, este cálculo se muestra en la Figura 3.15. Solo un 1.13% y 0.89% de las muestras entran en los peores rangos, en los cuales se desea evaluar el comportamiento del servicio.

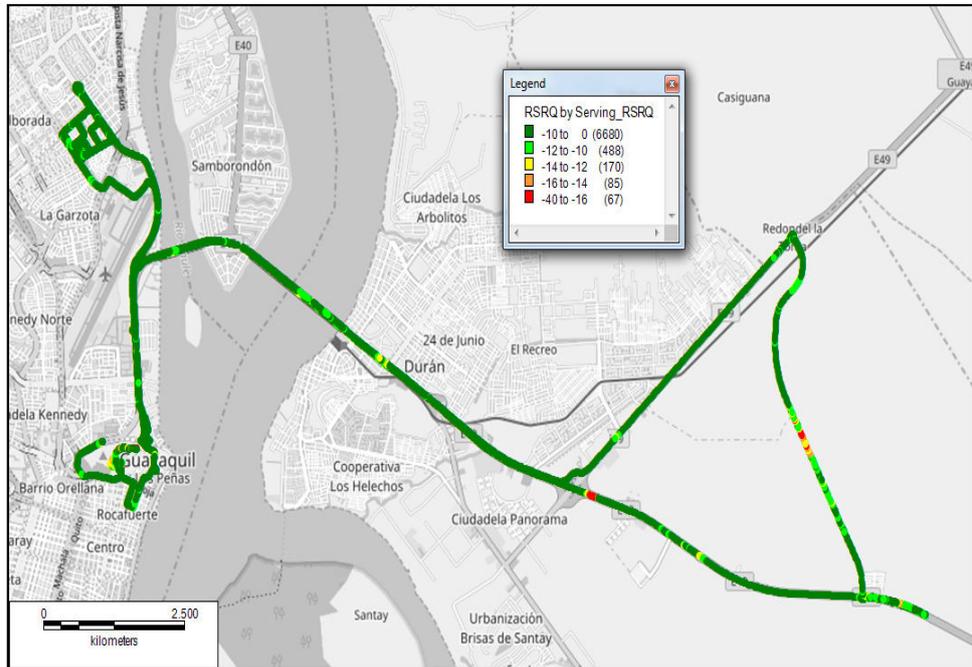


Figura 3.14. Calidad de señal recibida

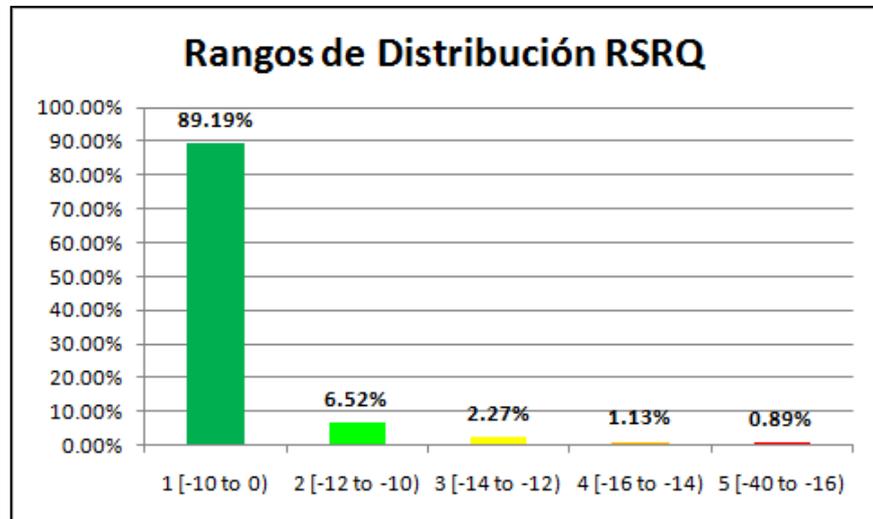


Figura 3.15. Distribución de Calidad recibida

- **Potencia Transmitida**

A continuación se muestra el comportamiento de la máxima potencia transmitida por el dispositivo móvil la cual se denomina

PUCCH-Physical Uplink Control Channel. Este canal es usado para transportar la información de control en enlace de subida: HARQ ACK/NACK, CQI, MIMO feedback... Es de esperar que en las zonas de más baja cobertura RSRP, el dispositivo móvil deba aumentar la potencia para poder mantener la conexión con el eNB. En la Figura 3.16 se muestran los resultados obtenidos.

De los resultados obtenidos es deseable evaluar el desempeño VoIP en zonas donde la potencia alcanza el rango de 15 a 24 dB.

El resumen de valores obtenidos durante las pruebas se detalla en la Figura 3.17, donde se observa que existe un 5.05% de muestras en el rango de 15 a 24 dB.

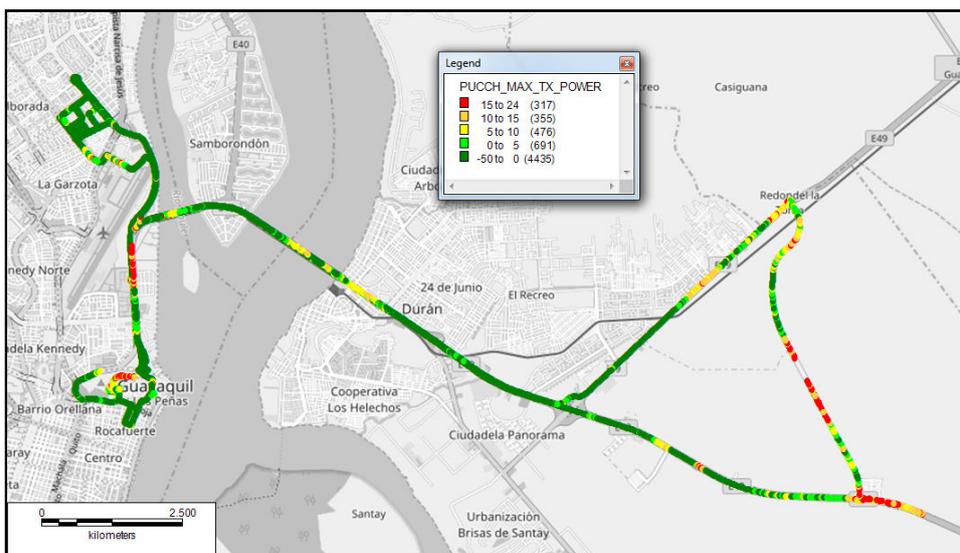


Figura 3.16. Potencia Transmitida por móvil

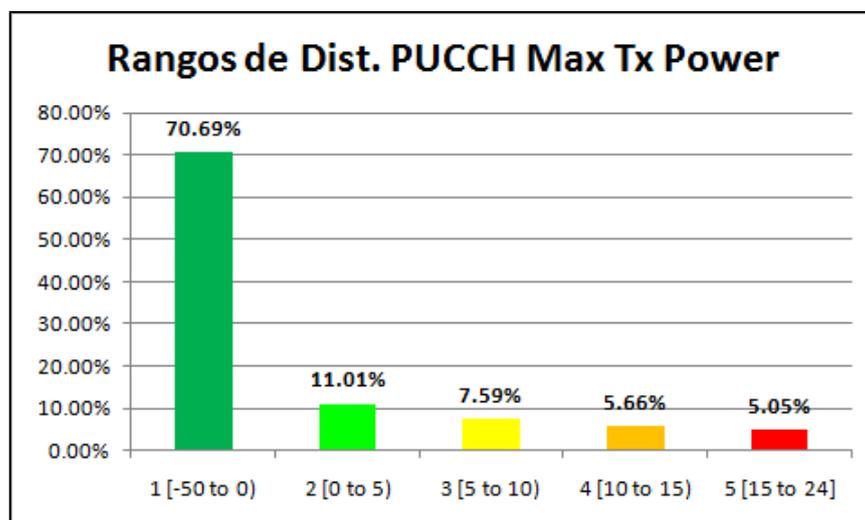


Figura 3.17. Distribución de potencia transmitida

- Mejor celda servidora

Para esta métrica utilizamos PCI. Se debe recalcar que este parámetro no es único en la red, se puede repetir, de acuerdo a la planificación realizada, en caso de requerir el identificador único de la celda, se debe utilizar el eNB Cell ID. La Figura 3.18 muestra los resultados obtenidos, se incluye leyenda numérica para los puntos obtenidos.

En la Figura 3.19 se incluye un gráfico de distribución de PCI por porcentaje, del cual podemos concluir que la celda con mayor porcentaje de muestras tiene el PCI=448.

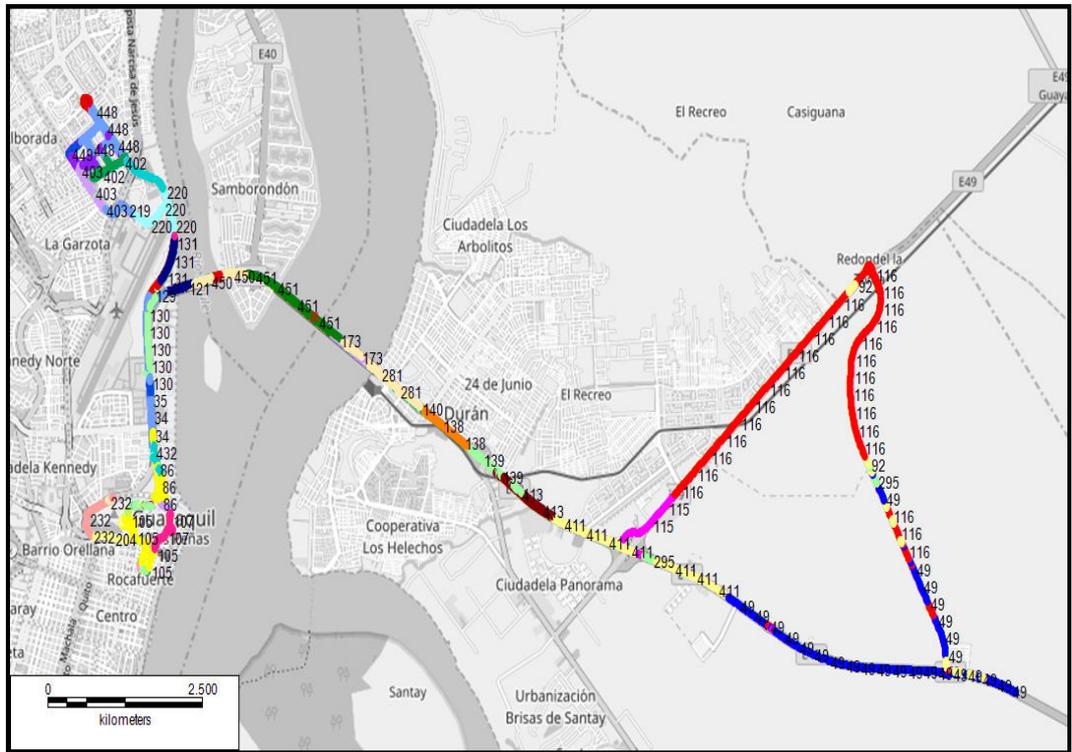


Figura 3.18. Celda mejor Servidora

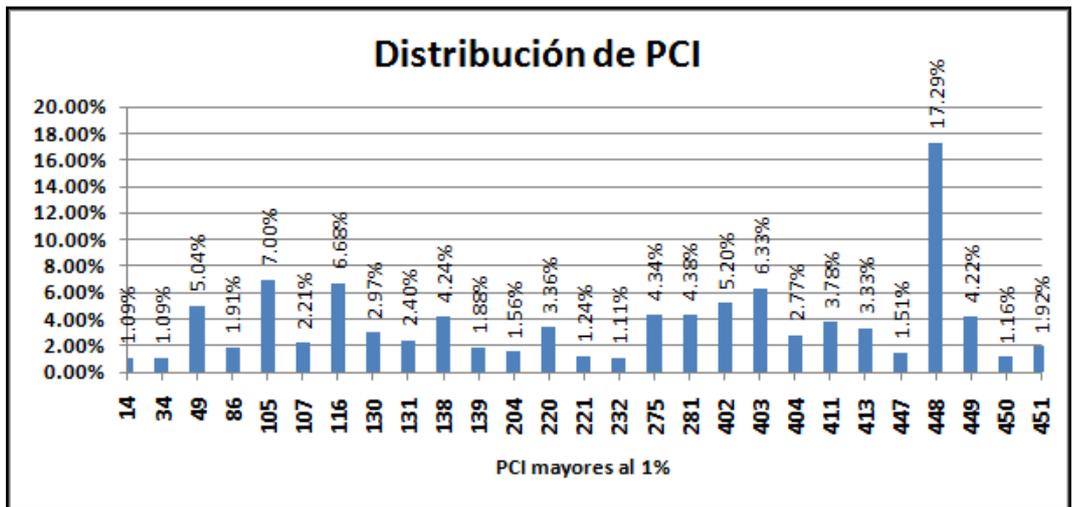


Figura 3.19. Distribución de Celdas Servidoras

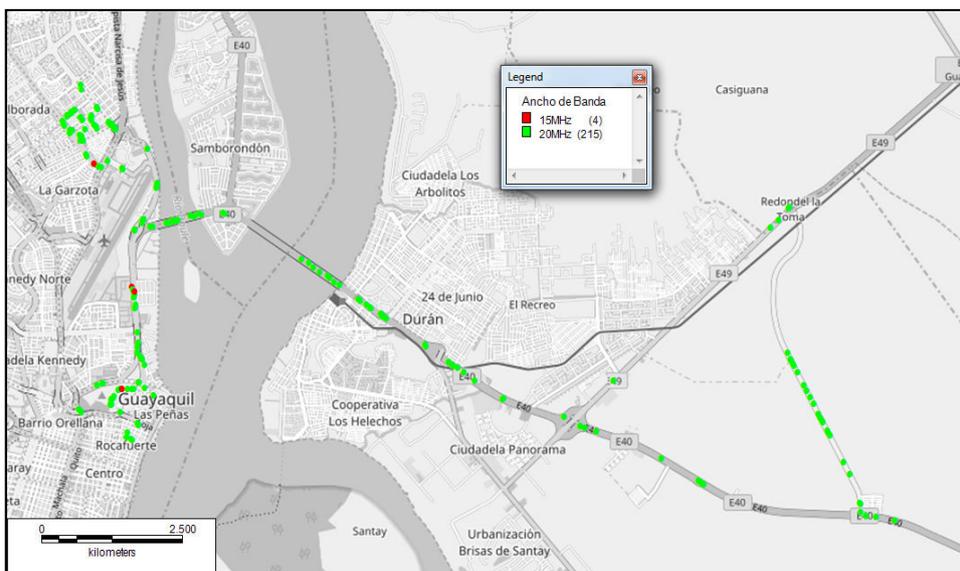


Figura 3.20. Ancho de banda reportado por la red

- Ancho de banda utilizado

En la Figura 3.20 se detalla el ancho de banda obtenido durante las pruebas. De 219 muestras reportadas, solo 4 reportaron un ancho de banda de 15Mhz y 215 muestras de 20Mhz, por lo tanto esta métrica no tiene mayor dependencia a la variación de cobertura. Por lo tanto se puede concluir que independientemente de cobertura y calidad, la red actual analizada se mantiene en 20Mhz, esto debido al hecho de que solo existe una portadora LTE de 20Mhz en funcionamiento. Esta métrica no se toma como referencia para el análisis de la calidad de VoIP, sin embargo debe tomarse en consideración para otros escenarios, como por ejemplo el de LTE CA. Recordar que una de las características de LTE es la flexibilidad, por lo que puede trabajar en diferentes anchos de banda.

- Throughput obtenido en enlaces descendente y ascendente

El dispositivo de medición fue capaz de capturar 3 tipos de throughput: Físico (PHY), RLC y PDCP. La métrica seleccionada

para nuestro análisis es de PDCP debido a que es la capa más cercana a la de aplicación, es decir, que se aproxima a lo que la aplicación necesita para mantener la comunicación de VoIP. Recordar que la capa física no solo contiene el throughput necesario de la aplicación, sino todo el necesario para establecer la comunicación, incluido el necesario para la señalización. En las Figuras 3.21 y 3.22 se muestran las gráficas del throughput PDCP obtenido tanto en los enlaces de bajada como de subida, las leyendas han sido ajustadas a los rangos obtenidos.

En la Figura 3.23 se muestra el throughput de capa física en enlace descendente, si lo comparamos al de PDCP DL, es mucho mayor esto debido a que no solo contiene información de la aplicación, sino información de señalización, control...

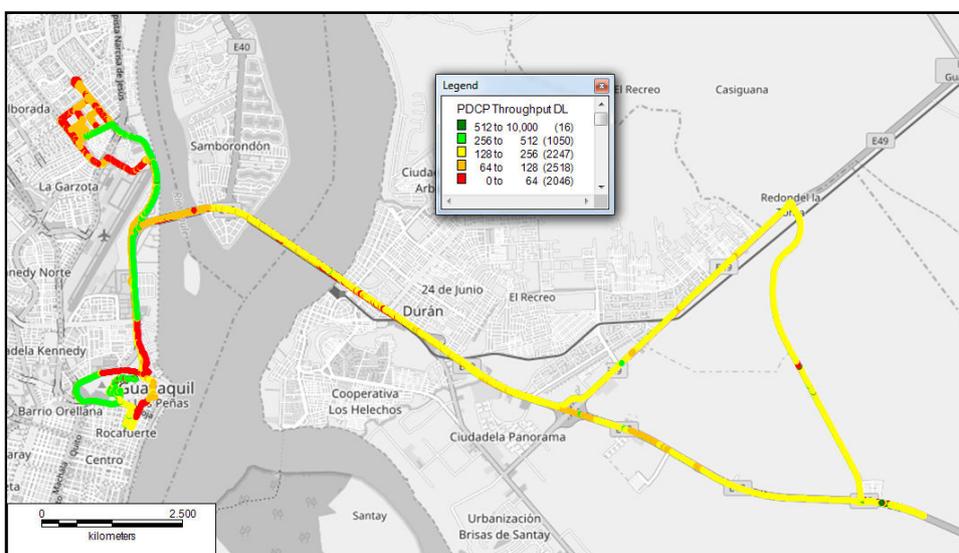


Figura 3.21. Throughput PDCP enlace descendente

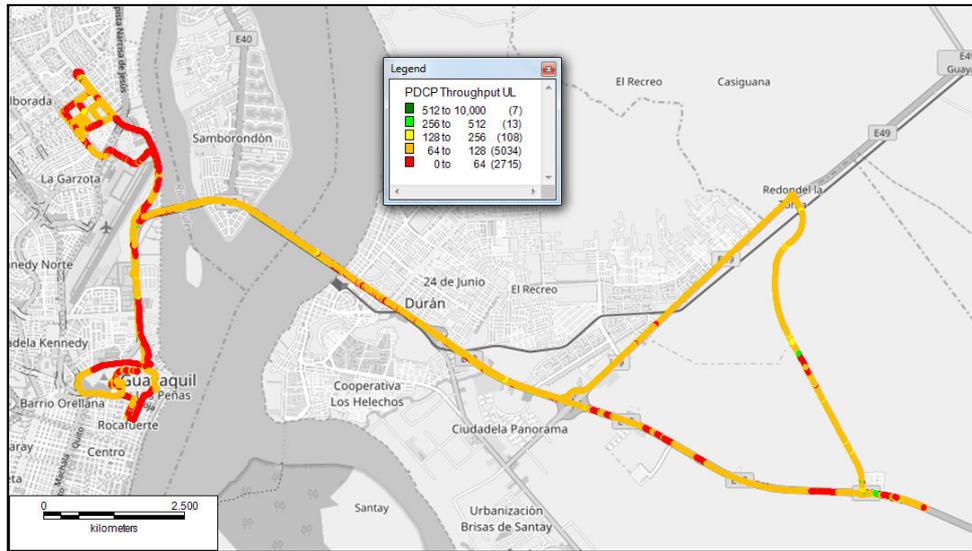


Figura 3.22. Throughput PDCP enlace ascendente

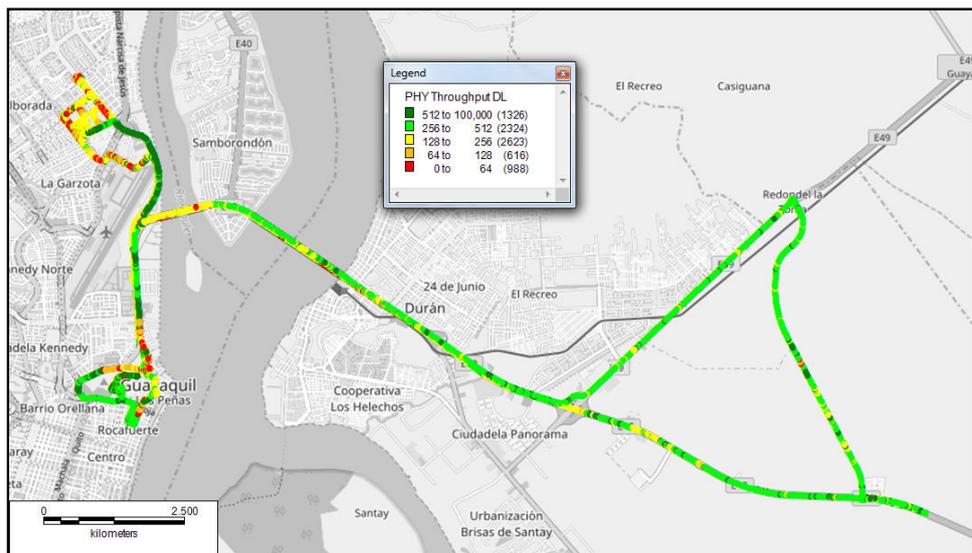


Figura 3.23. Throughput de capa física enlace descendente

En la Tabla 10 se muestra una comparación de los valores de throughput obtenidos para las diferentes capas.

Throughput	PDCP DL	PDCP UL	PHY DL
Máximo (Mbps)	9.962	1.052	35.194
Promedio (Kbps)	145.941	76.178	516.399
Des. Std (Kbps)	201.512	55.654	1207.892
No. de Muestras	7838	7838	7554
% de muestras > a promedio	41.35%	65.18%	17.45%

Tabla 10. Comparativa de throughput obtenidos

Por lo tanto se concluye que el throughput obtenido de capa física es mayor, sin embargo no quiere decir que este sea el throughput usado por la aplicación.

3.5.2. Métricas en VoIP

A continuación se incluyen las métricas de VoIP que se usan para realizar el análisis. Todas estas métricas son obtenidas en el Servidor de VoIP con ayuda del software Wireshark, sin embargo el SoftPhone utilizado para este proyecto posee detección de calidad de red luego de finalizar una llamada de VoIP si esta es de mala calidad se muestra una pantalla de estadísticas en la cual se incluyen las principales métricas de red IP. En la Figura 3.24 se muestra un ejemplo de detección de mala calidad en la red luego de finalizar una llamada usando Zoiper.

- Jitter

Wireshark nos da la posibilidad de analizar el RTP, el cual es utilizado para transportar la información multimedia de VoIP. Para utilizar esta herramienta, el proceso es el siguiente: *Abrir la traza -> Telephony -> RTP -> RTP Streams*. Luego de lo cual podremos verificar todas las conversaciones RTP que se encuentren grabadas en las trazas capturadas. La Figura 3.25 muestra un ejemplo de la información capturada donde se muestran las columnas con información necesaria para el análisis:



Figura 3.24. Ejemplo de Detección de Mala calidad de Red - Zoiper

Source Address	Source Port	Destination Address	Destination Port	SSRC	Payload	Packets	Lost	Max Delta (ms)	Max Jitter	Mean Jitter	Status
25.8.132.162	51712	25.93.6.34	12830	0xc96f456b	Unassigned	120	5 (4.0%)	292.600	40.609	28.932	•
25.8.132.162	51712	25.93.6.34	15844	0xd19d5781b	Unassigned	892	4 (0.4%)	275.556	40.426	25.404	•
25.8.132.162	51712	25.93.6.34	17528	0x58ff868a	Unassigned	52745	821 (1.5%)	91697.628	138.789	20.919	•
25.8.132.162	51712	25.93.6.34	13794	0xd233c587	Unassigned	1373	2 (0.1%)	345.284	42.774	21.447	•
25.8.132.162	51712	25.93.6.34	15686	0x4f6d1f05	Unassigned	1446	7 (0.5%)	276.822	35.869	21.499	•
25.8.132.162	51712	25.93.6.34	10096	0x4d1a9edd	Unassigned	1782	5 (0.3%)	310.051	38.629	21.132	•
25.8.132.162	51712	25.93.6.34	10144	0xe9b04e3e	Unassigned	1281	5 (0.4%)	304.159	40.352	21.547	•
25.8.132.162	51712	25.93.6.34	17848	0x7f03310f	Unassigned	1723	6 (0.3%)	334.141	39.666	21.745	•
25.8.132.162	51712	25.93.6.34	10530	0xc4a65aaf	Unassigned	439	0 (0.0%)	447.839	44.794	22.414	•
25.93.6.34	12830	25.8.132.162	51712	0x7e3e2702	g711U	152	0 (0.0%)	20.769	0.338	0.056	•
25.93.6.34	17528	25.8.132.162	51712	0x383c7e4	g711U	56804	4294963081 (8167037.0%)	65.532	3.565	0.033	•
25.93.6.34	13794	25.8.132.162	51712	0x5e5f7ca0	g711U	1359	0 (0.0%)	23.697	0.683	0.042	•
25.93.6.34	15686	25.8.132.162	51712	0x568ff1e9	g711U	1437	0 (0.0%)	21.029	0.082	0.025	•
25.93.6.34	10096	25.8.132.162	51712	0xe04a533	g711U	1773	0 (0.0%)	21.140	0.154	0.027	•
25.93.6.34	10144	25.8.132.162	51712	0x7f9d824f	g711U	1271	0 (0.0%)	21.013	0.076	0.024	•
25.93.6.34	10530	25.8.132.162	51712	0x3200dd0e	g711U	439	0 (0.0%)	21.023	0.085	0.029	•
192.168.1.15	15866	192.168.1.17	43368	0x78f93ffc	g711U	2276	0 (0.0%)	21.925	0.238	0.013	•
192.168.1.15	17844	192.168.1.17	43368	0x4ae7e14b	g711U	561	0 (0.0%)	20.084	0.020	0.008	•
192.168.1.17	43368	192.168.1.15	15866	0x4ff533c7	Unassigned	115	74 (39.2%)	1922.875	112.124	27.257	•
192.168.1.17	43368	192.168.1.15	15276	0x7f939842	Unassigned	311	0 (0.0%)	141.842	24.623	9.371	•
192.168.1.17	43368	192.168.1.15	14490	0xab8ccee7	Unassigned	279	1 (0.4%)	204.268	31.599	12.809	•
192.168.1.17	43368	192.168.1.15	17844	0xb88ae5b	Unassigned	1	0 (0.0%)	0.000	0.000	0.000	•

Figura 3.25. Ejemplo de análisis RTP Streams

Para este ejemplo, para analizar el Jitter seleccionamos la conversación RTP con mayor número de paquetes y ejecutamos la opción *Analyze*, luego de lo cual podremos analizar de manera gráfica el Jitter, en función del tiempo, el resultado se muestra en la Figura 3.25. Del resultado obtenido en el ejemplo, se tiene un Jitter

variable pero de promedio 20.92ms. El promedio se encuentra dentro de los rangos aceptables para una transmisión de voz en tiempo real aunque se observa un pico máximo de 138.79ms. Este ejemplo usa información capturada con el primer método de medición propuesto en la sección 3.3.4, para una zona con excelente cobertura LTE.

La Figura 3.26 muestra el análisis del Jitter en función del tiempo, utilizando las herramientas de Wireshark. Para este ejemplo se puede observar que el Jitter se mantiene en promedios de 20 ms con picos espontáneos de hasta 140 ms.

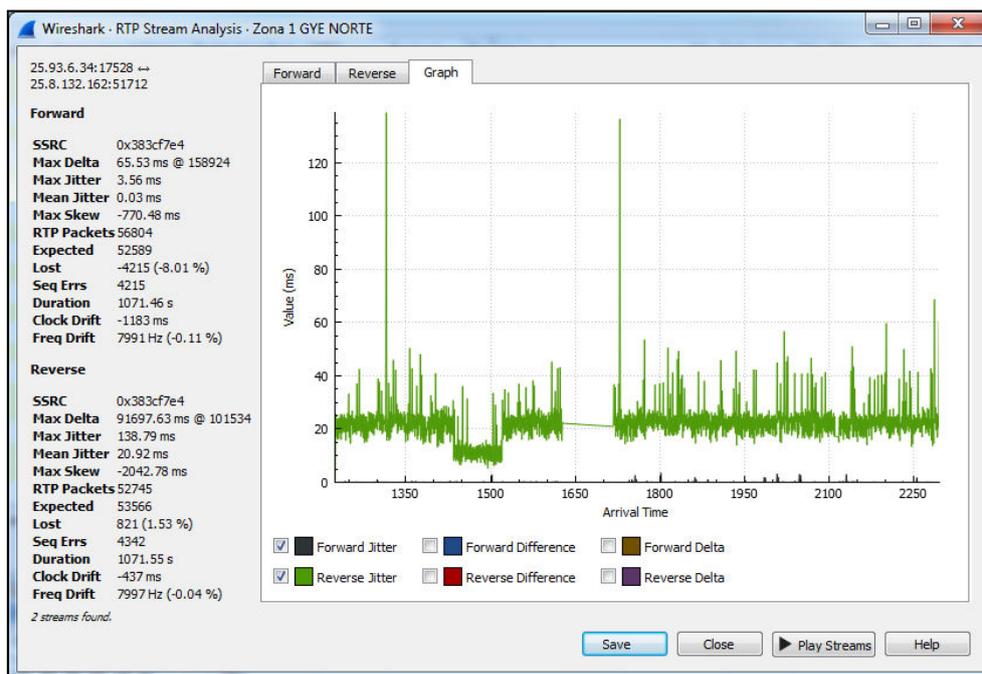


Figura 3.26. Ejemplo de análisis Jitter

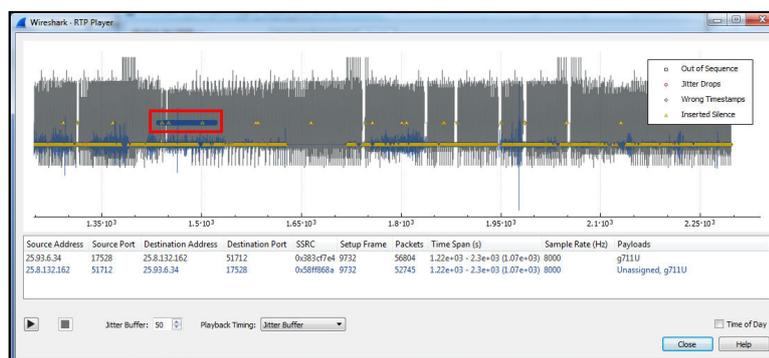


Figura 3.27. Ejemplo de Playback Stream

Adicionalmente podemos analizar la conversación utilizando la opción PLAY STREAMS, el resultado es mostrado en la Figura 3.27 el cual nos permite reproducir la conversación de VoIP, al mismo tiempo se indica de manera gráfica 4 métricas de calidad de servicio: Out of Sequence, Jitter Drops, Wrong Timestamps e Inserted Silence. Esta herramienta es de mucha utilidad ya que nos permite encontrar los problemas de calidad de VoIP durante las pruebas realizadas. Para este mismo ejemplo de la Figura 3.27 se indica con un cuadrado color rojo, el problema de calidad detectado: Perdida de secuencia, lo que perjudica notoriamente la QoS.

- Retraso

Se mantiene el análisis RTP para procesar el retraso, el mismo puede ser exportado a tablas de Excel. Ejemplos de esta métrica se tienen en las Figuras 3.25 y 3.26. Una de las cualidades de la red LTE es su baja latencia, es decir, posee valores aceptables de retraso. En el capítulo 4 se realiza un análisis de este parámetro en condiciones de baja cobertura y calidad de red LTE.

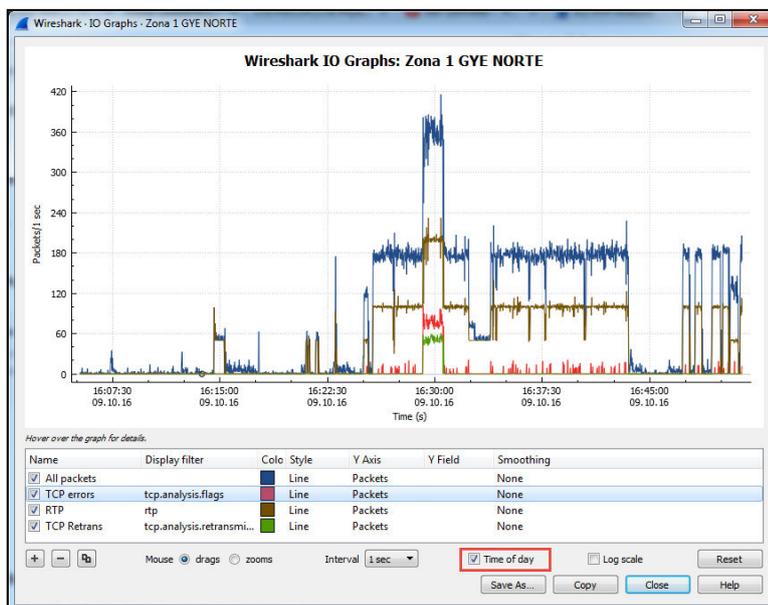


Figura 3.28. Ejemplo de Wireshark IO Graph

- Pérdida de datagramas

Al igual que el Jitter y el retraso, este parámetro puede ubicarse utilizando el análisis RTP, sin embargo también puede realizarse un análisis usando gráficas I/O de Wireshark. En el ejemplo de la Figura 3.28 se observan errores en TCP y aumento de paquetes RTP a partir de las 16:29:10 hasta las 16:30:37, lo cual es de gran ayuda para realizar correlación con los parámetros de red LTE en ese instante de tiempo.

3.6. Ejecución de Experimento

Para proceder a ejecutar el experimento, se debe seguir el modelo de pruebas que se especificó en la sección 3.1.1:

- Modelo funcional en todos sus componentes:
 - Servidor VoIP.
 - Teléfono en LTE con cliente VoIP.
 - Comunicación entre SoftPhone en LTE con el servidor VoIP.
- Los puntos de medición deben adecuarse a la Figura 3.7.

- Se debe tener definida el camino o zona de evaluación.

Una vez confirmados los puntos anteriores se procede a evaluar los métodos de medición de QoS de VoIP sobre LTE. Los métodos fueron propuestos en la sección 3.3.4. Luego de la evaluación de los experimentos y los posibles resultados, se seleccionó como base para la ejecución de experimentos el tercer método, esto debido a que los objetivos de este método se ajustan mejor a los resultados esperados en el desarrollo de este proyecto. En el capítulo 4 se incluye un análisis de los métodos de evaluación y del porqué seleccionar el tercer método.

3.6.1. Frecuencia de recolección de datos

En la práctica, para una red activa, la recolección de datos debe de ejecutarse cada vez que se realicen cambios en la red, ya sea en la Red de acceso LTE o en el *core*, o en la red IP y en los servidores IP. Normalmente los cambios de parámetros afectan el desempeño del servicio, por tal motivo las operadoras se basan en información estadística para evaluar cualquier cambio en sus sistemas. Sin embargo siempre es necesario la recolección de datos y la evaluación del servicio desde el punto de vista del usuario final, para de esta forma asegurar el óptimo servicio. En conclusión, la frecuencia de recolección de datos está ligada a los cambios que operadora de servicio ejecute en su red. Para el desarrollo de este proyecto, no se tiene información de la operadora de servicio, por tal motivo la recolección de datos solo se hizo una vez. Se considera esta información suficiente para un análisis del método usado y para la evaluación de la calidad de servicio de VoIP, sin embargo el análisis de las zonas geográficas puede variar con el paso del tiempo, debido al normal desarrollo y aplicación de las redes LTE.

3.6.2. Tipos de llamada VoIP a realizar

Los tipos de llamada de VoIP se definen en el método a usar. Diferentes métodos pueden ser usados para obtener diferentes resultados, según lo que se desee evaluar. Generalmente en pruebas de campo para las llamadas de voz se requiere evaluar dos parámetros fundamentales: la capacidad de acceso al servicio y la retención del servicio durante todo el tiempo que dure la transferencia de información. Estos dos parámetros son requeridos al 100% para asegurar la experiencia de usuario y su QoS.

Si un usuario experimenta problemas de acceso al servicio deseado su percepción del servicio sería muy mala aun cuando no se esté evaluando ningún parámetro de QoS, esto es un factor clave en la decisión de abandonar el servicio. En cambio si el usuario establece una llamada de voz, pero experimenta corte de servicio o falla de calidad, errores de transmisión... esto pertenece a la QoS, y también es importante su evaluación.

Por los motivos expuestos en los párrafos anteriores, los métodos de medición que usan los operadores incluyen realizar llamadas cortas para medir capacidad de acceso y llamadas de tiempo infinito para medir capacidad de retención de servicio. Para el desarrollo de este trabajo debido a la limitante de equipos que pueden ser usados para recolectar información de red LTE, se escoge realizar una llamada infinita, ya que no solo nos permite evaluar la retención de servicio, sino que nos permite evaluar la QoS de la llamada, en cualquier condición de radio frecuencia de la red LTE, lo cual es uno de los objetivos del desarrollo de esta investigación.

3.6.3. Captura de paquetes en el Servidor usando Wireshark

En la *sección 3.3* se detallan las conexiones a realizarse para capturar la información, para este caso la Figura 3.7 muestra la

ubicación del punto de medición de Wireshark: puerto Ethernet de servidor VoIP que conecta el servidor con el encaminador del proveedor de servicios.

Para el caso de análisis de otras metodologías o evaluación de servicios de VoIP de aplicaciones como Facebook Messenger, WhatsApp... se debe configurar el punto de conexión de Wireshark en el cliente de VoIP.

Durante la configuración de captura de paquetes en Wireshark, para un análisis más detallado, se recomienda capturar todos los protocolos ofrecidos por la herramienta, aunque esta configuración creará archivos de captura muy grandes, por lo que también es recomendable filtrar la captura por protocolo UDP. También es recomendable configurar la auto división de archivos, para que no se pierda información en caso de una falla en el servidor, el en software de captura...

CAPÍTULO 4

4. ANALISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se incluye el análisis detallado de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas.

4.1. Definición del análisis de resultados

Se define el análisis de resultados de la siguiente manera:

1. Especificación de escenarios de estudio donde se incluye análisis comparativo y detalle de los métodos evaluados para la medición de QoS sobre LTE.
2. Luego del análisis se especifica el método seleccionado para realizar los estudios de correlaciones entre VoIP y LTE
3. Se proponen modelos adicionales para ejecutar la evaluación de parámetros de VoIP sobre LTE.

4.1.1. Especificación de escenarios de estudio

Se hace referencia a la *sección 3.3.4* de este trabajo, donde se plantearon 3 métodos para la evaluación de la calidad de servicio de VoIP sobre LTE, que en resumen consiste en evaluar:

- *Método 1*: la QoS de VoIP en zonas urbanas, geográficamente planas, donde se asume buenas condiciones de cobertura y calidad LTE.
- *Método 2*: la QoS de VoIP en tres zonas diferentes de Guayaquil usando la aplicación playback de Asterisk.
- *Método 3*: la QoS de VoIP en tres zonas diferentes de Guayaquil usando la aplicación SayNumber de Asterisk.

Para todos los métodos propuestos se necesita seguir el modelo de pruebas planteado el cual consiste en un servidor de VoIP conectado a Internet y el usuario de VoIP que evaluará la QoS de VoIP y la QoS de LTE en un automóvil, conectado al servidor VoIP y capturando información de posicionamiento con ayuda de GPS. Este modelo se encuentra en *la sección 3.1.1* y se detalla en la Figura 3.1 (se usa el mismo modelo de pruebas para evaluar todos los métodos propuestos).

- **Evaluación de primer método**

Los objetivos del primer método de evaluación fueron:

- Verificar servicios de la red LTE una zona urbana de Guayaquil donde se asume una excelente cobertura.
- Verificar el correcto funcionamiento del modelo de captura propuesto en la *sección 3.1*.
- Evaluar la QoS de VoIP en Servidor de VoIP. La persona encargada de realizar las pruebas en el vehículo percibe la QoE, debido a que va escuchando el audio durante todo el recorrido, sin embargo no lleva un registro de la QoE en función de los datos capturados.
- Detectar posibles problemas de Red LTE en condiciones de buena cobertura, los cuales afecten a la QoS en VoIP.

Durante la evaluación de este método, a nivel de usuario se tuvo una buena percepción de la QoS de VoIP. Sin embargo se debe recalcar que esta es una opinión subjetiva de la persona que realizó las pruebas y no una medida de QoE, ya que no se aplicó ningún método de MOS o similar. No se encontraron problemas en la red LTE como interferencia, congestión o algún otro evento con buena cobertura que produzca alguna falla en la QoS de VoIP.

La opinión de una buena experiencia de servicio del usuario se basó en los siguientes postulados:

1. No se experimentaron cortes en la comunicación.
2. No se experimentaron degradaciones en el audio.
3. La calidad del audio es buena, y suficiente para mantener una conversación clara y continua.
4. El tiempo de acceso al servicio fue menor a 5 segundos, no existieron problemas para establecer la comunicación.

En la Figura 4.1 se muestran los niveles de cobertura RSRP obtenidos en la zona evaluada: Se observa un alto porcentaje de muestras mayores a -95dBm, se debe enfatizar que para la cobertura entre -75 dBm y -95 dBm podría existir una ligera afectación de la QoS en LTE; el throughput podría decaer entre 20% y 50% de sus valores máximos, sin embargo en general el servicio se mantiene estable. Adicionalmente, la Figura 4.1 muestra los rangos o umbrales de RSRP vs la celda servidora PCI, donde se ha marcado los cambios de PCI se observa un cambio repentino de comportamiento de RSRP hacia mejores niveles, esto se debe al traspaso o Handover entre celdas. Se puede concluir que aún cuando se observaron picos de hasta -105 dBm de RSRP, lo que significa que existieron instantes de baja cobertura, las métricas QoS de VoIP no se vieron afectadas y la percepción del servicio por parte de la persona que realizó las pruebas en general fue buena, debido a que no existió cortes en la comunicación ni degradaciones en la señal de audio. Según nuestra definición de RSRP, para niveles entre -100 y -108 dBm la QoS de LTE puede llegar a ser inaceptable, y para valores menores a -108 dBm pueden existir llamadas caídas e imposibilidad de iniciar sesión de datos.

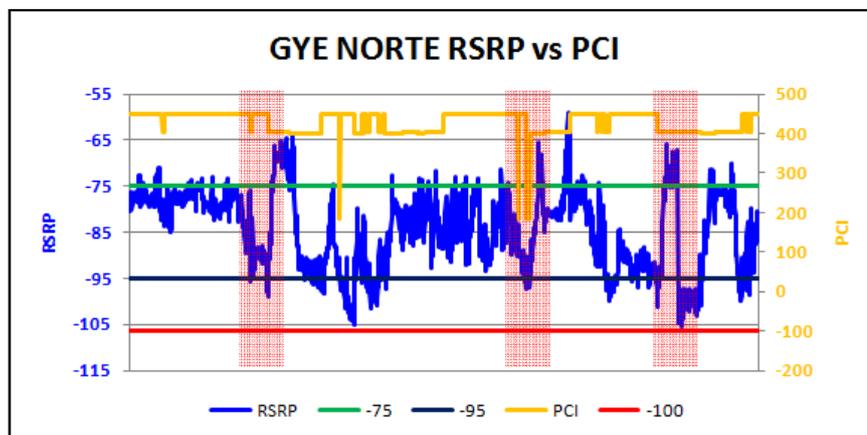


Figura 4.1. Resultado Primer Método RSRP vs PCI

Luego de haber evaluado el método, a continuación se incluye un análisis y observaciones del mismo:

- Es necesaria la disponibilidad de por lo menos 2 personas para realizar la prueba.
- Para calcular la QoE, es necesario la ejecución de pruebas de MOS que se basa en opiniones subjetivas, la única información que se tiene es la opinión de los participantes en la prueba sobre la QoE.
- En caso de requerir mucho tiempo de pruebas y mucha información para su posterior análisis, este método no es recomendable. Sería muy desgastante tener dos personas hablando todo el tiempo en que se realizan las pruebas y estas mismas tener que estar atentas a los eventos de degradación de calidad de voz.
- Luego de evaluar el método propuesto, se comprueba buena cobertura en la zona evaluada; para este estudio fijaremos buena cobertura RSRP a los valores de potencia recibidos mayores a -105 dBm. Debido a la buena cobertura observada, no es recomendable este método para realizar una correlación de Cobertura vs. QoS, porque al no tener variación de cobertura o

zonas de mala cobertura, no podemos ver qué sucede con la QoS, la QoS se mantiene constante, y en caso de que falle, sería por factores ajenos a la red LTE, como por ejemplo la red de transporte de los eNB o por la red local de Internet en el servidor VoIP.

- Evaluación del segundo método

Debido a que para desarrollar el primer método de pruebas es necesario de dos recursos humanos para verificar en todo momento la QoE, y que la falta de un proceso o definición de protocolo de pruebas de voz entre dos personas puede provocar zonas en las que se deje de evaluar por no tener temas de conversación o simplemente por alguna pausa inesperada en algún interlocutor, se propone el segundo método.

Para resolver el primer problema sería ideal usar un solo recurso que capture la información y verifique la calidad de experiencia de usuario. Por lo tanto este método plantea usar la programación de aplicaciones de Asterisk en el servidor VoIP, para optimizar el recurso humano que realiza las pruebas. Para desarrollar el segundo método, como se muestra en la Figura 4.2 en el servidor de VoIP se crea una extensión con la siguiente programación de extensiones para Asterisk.

```
exten => 555,1,Playback(vm-intro)
exten => 555,n,Record(bienvenida.gsm)
exten -> 555,n,Wait(1)
exten -> 555,n,Playback(bienvenida)
exten -> 555,n,Hangup()
```

Figura 4.2. Programación en Asterisk Record & Playback

El protocolo de pruebas se basa en marcar la extensión 555 del servidor de VoIP, grabar un mensaje aleatorio, y luego escuchar el

mensaje grabado. Luego de haber evaluado el método, a continuación se incluye un análisis y observaciones del mismo:

- El método se resume en llamar al servidor, guardar un mensaje y escuchar el mensaje guardado, todo esto mientras se evalúa el desempeño de VoIP y de LTE.
- Ya no es necesaria la disponibilidad de dos personas, por lo que su ejecución se hace más fácil; no es necesario ponerse de acuerdo entre interlocutores.
- Mientras se guarda un mensaje en caso de existir pérdida de paquetes desconexión, o algún evento de degradación, esto quedará registrado de tal manera que la persona que hace la prueba, detecte el problema y la zona de problemas, esto con el objetivo de realizar un mayor análisis en zonas específicas.
- El nivel de dificultad para la persona que evalúa aumenta, ya que debe verificar servicios de LTE y al mismo tiempo verificar QoE en VoIP.
- Debido al retraso entre grabar un mensaje y volverlo a escuchar, se corre el riesgo de dejar zonas sin evaluar, lo que deja la posibilidad de no detectar problemas en la red.
- La persona que realiza las pruebas debe marcar constantemente la extensión 555, por este motivo dificulta el trabajo de monitoreo de QoE y deja abierta la posibilidad de dejar zonas sin evaluar entre cada marcado.

- **Evaluación de tercer método**

El segundo método presentó mejoras en cuanto a la cantidad de personas necesarias para ejecutarlo, sin embargo se agrega la dificultad de marcar constantemente a la extensión, la de grabar el mensaje y reproducirlo de nuevo. Para evitar estos problemas, una solución simplemente sería reproducir una grabación o una canción conocida.

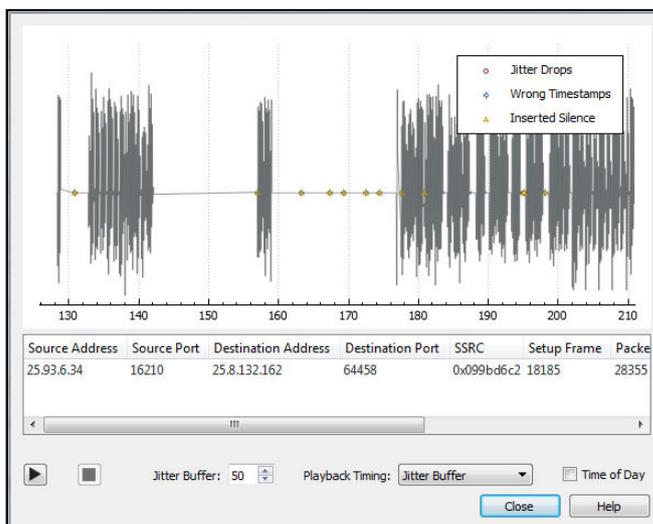


Figura 4.3. Reproducción de traza de VoIP en Wireshark

Al repetir una grabación usando Wireshark podremos detectar de manera gráfica los problemas de experiencia de usuario de VoIP en diferentes escenarios de LTE, sin embargo, sin embargo este trabajo es mas engorroso, debido a que se debe procesar las trazas capturadas en el servidor, adicionalmente esta grabación solo nos mostrará información capturada del lado del servidor, y no del lado del cliente, a continuación, en la Figura 4.3 se muestra un ejemplo de la reproducción de una traza de voz usando Wireshark, la misma muestra silencios que aparecieron en la reproducción, pero que no son deseados, lo que quiere decir que sucedió un evento del lado del Usuario.

Por lo antes expuesto, el tercer método propone el uso de la programación de aplicaciones de VoIP en Asterisk para generar un contador hablado. Generar una secuencia hablada de números mantendría siempre atento a la persona que realiza las pruebas, la cual detectaría rápidamente si el conteo no es continuo, si existe o no alguna variación... lo cual es ideal para evaluar la experiencia del servicio durante la ejecución de la evaluación. Sin embargo para tener una correcta medición de QoE, se debería realizar varias

pruebas similares para luego usar MOS, lo cual no se realizó durante la evaluación de este método.

En la Figura 4.4 se muestra la programación necesaria para generar un lazo de conteo al marcar la extensión 111.

Este programa usa la función *SayNumber*, la cual traduce de texto a voz el número ingresado en su argumento. Para este método, se utiliza la variable *i*, desde $i=1$ para comenzar el conteo en 1 y seguir hasta 999, luego de lo cual terminará el proceso.

Por lo tanto, luego de evaluar el tercer método propuesto, a continuación se incluye un análisis y observaciones del mismo:

- Se mantiene la mejora con respecto al primer método, únicamente es necesario una persona para ejecutar pruebas y verificar la experiencia de usuario.
- Se vuelve más fácil en comparación al segundo método, ya que la persona que evalúa el desempeño se concentra en la secuencia de números.
- La evaluación de QoE se enfoca en el usuario móvil, sin embargo en caso de existir intermitencia en el servidor de VoIP podría ser detectado, como silencio o como pérdida de sincronismo en el conteo.
- Resulta más sencillo detectar una falla, pérdida de paquetes, silencios... simplemente siguiendo con atención la secuencia numérica.
- En comparación al segundo método en el que se realizan llamadas constantemente a una extensión, para el tercer método, se evalúa el servicio con una llamada continua, esto agiliza el proceso de verificación para el evaluador. Solo se vuelve a marcar la extensión en el caso de un corte de la continuidad del servicio, conocido también como Llamada caída o Call Drop. Fuente de consulta Call Drop: sección 4.4.2 [26].

En conclusión se seleccionó al tercer método, como el más adecuado para realizar el estudio del comportamiento de la tecnología de VoIP en los diversos escenarios de cobertura y calidad de LTE. Se procedió a ejecutar el total de las pruebas en diferentes áreas de la ciudad de Guayaquil descritas en *la sección 2.1.1.*

```
exten => 111, 1, Answer()  
exten => 111, n, Set(i=1)  
exten => 111, n, While($[${i} < 1000])  
exten => 111, n, SayNumber(${i})  
exten => 111, n, Set(i=${i} + 1)  
exten => 111, n, EndWhile
```

Figura 4.4. Programación en Asterisk Conteo

4.1.2. Limitaciones del análisis

Durante el desarrollo de todo este proyecto se han encontrado todo tipo de limitaciones las cuales afectan directa o indirectamente en análisis final, a continuación se incluye un resumen de las principales limitantes encontradas:

- *Servidor de VoIP*: para el desarrollo de este proyecto era necesario establecer comunicación entre el teléfono perteneciente a la red LTE y el Servidor de VoIP en Internet. Para montar el servidor se usó una conexión de Internet doméstica, la cual no fue flexible en su configuración, no se conoce elementos de red del proveedor de servicios de Internet, la configuración de red no está disponible para el usuario final. Por tal motivo el modelo propuesto se basa en el uso de VPN para intercomunicación entre dispositivos de otras redes.
- *LTE*: no se conoce la topología de red del proveedor de servicio. El estudio se limita a los datos capturados durante las pruebas. Por este motivo no se incluye en el análisis la métrica de LTE:

desempeño de enlace de transmisión de datos entre eNB y red de *core*.

El estudio se limita al análisis de una sola red LTE, de las 3 redes disponibles en Ecuador. Sin embargo para este análisis se realiza una comparación de la cobertura obtenida con respecto la información publicada en la página de la aplicación OpenSignal [38].

- *Zonas evaluadas*: el análisis se limita al uso de los datos capturados en las zonas descritas en el Capítulo 2.1.1. Zona plana urbana, Zona plana de baja cobertura y Zona alta (de geografía irregular).
- *Datos Capturados*: se debe tener en consideración el dinamismo de las redes móviles, por este motivo existe posibilidad de la caducidad del análisis geográfico realizado con datos capturados, esto se debe principalmente a la puesta en operación de sitios nuevos en la red LTE y a la optimización realizada por los operadores de servicios.

Por tal motivo para futuros estudios se recomienda evaluar la información de cobertura actualizada, la misma puede consultarse en la página web de OpenSignal [38].

4.2. Estudio de correlaciones

En esta sección se analizan la relación entre las métricas de la red LTE y las métricas de VoIP.

Las métricas de la *sección 3.5.1* están orientadas a la calidad de la señal de Radio Frecuencia, esto en resumen se debe a que el estándar de la red LTE presenta su mejor desempeño cuando el dispositivo móvil se encuentra en muy buenas condiciones de Radio Frecuencia, es decir, buena cobertura y sin interferencias externas que afecten la calidad de la señal. Sin embargo como se describió en la *sección 4.1.2* de limitantes de análisis, debido a que

no conocemos topología de red ni información adicional de la red de CORE (EPC), no se incluye métrica de calidad de transmisión de datos entre eNB y EPC, aunque esta métrica también sea de importancia para evaluar el desempeño de los servicios de LTE. En conclusión las métricas de LTE a ser analizadas en este trabajo, en su conjunto forman la QoS de LTE en la parte de radio acceso (EUTRAN).

Las métricas de VoIP orientadas a QoS que evaluamos en esta investigación son: jitter, retraso y pérdida de datagramas. Una alteración negativa en cualquiera de estas métricas podría afectar directamente a la QoS de la VoIP, lo que al mismo tiempo afectaría la QoE, prácticamente es una reacción en cadena de efectos negativos.

La Figura 4.5 trata de explicar que el análisis de todas las métricas propuestas definen la QoS en conjunto de LTE + VoIP, lo que podría tomarse como referencia para futuros estudios de QoS en VoLTE.

Para definir la aceptabilidad del servicio de VoIP sobre LTE podemos utilizar las siguientes métricas:

1. Retención del servicio.
2. Accesibilidad al servicio.
3. MOS del servicio.

4.2.1. Análisis de Cobertura vs. QoS

Antes de analizar la información capturada durante las pruebas realizadas, a continuación se incluye un análisis de cobertura de red LTE en la ciudad de Guayaquil realizado con la herramienta de OpenSignal [38].

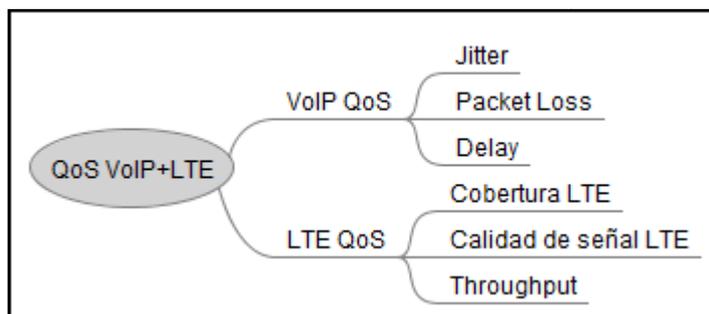


Figura 4.5. Métricas de QoS LTE y VoIP

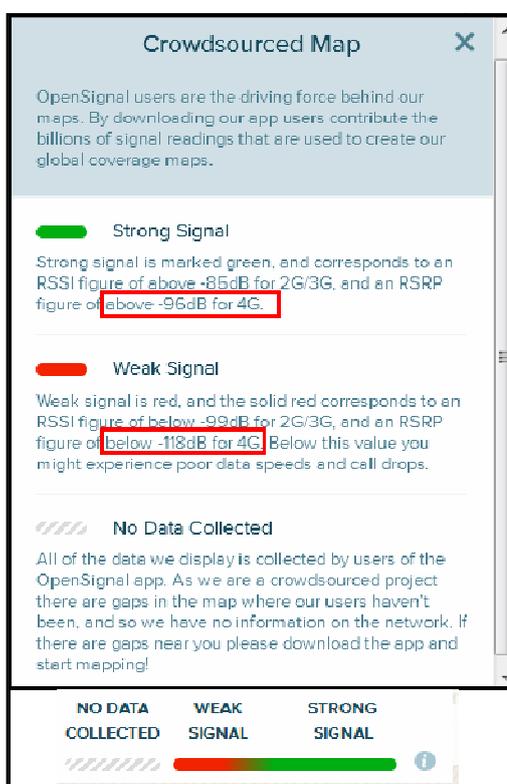


Figura 4.6. Leyenda y rangos de RSRP en OpenSignal

Fuente: [38]

El primer punto a considerar es la leyenda usada por OpenSignal, la cual se muestra en la Figura 4.6.

En resumen, valores mayores a -96dB se considera como nivel de señal excelente y se marcan en color verde, mientras que los valores

menores a -118dB son considerados como señal pobre, o de mala cobertura y se marcan como rojo.

En las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9, se muestra la cobertura LTE de acuerdo al RSRP para las tres operadoras de telefonía móvil, esta información fue actualizada por OpenSignal el 22 de Noviembre de 2016.

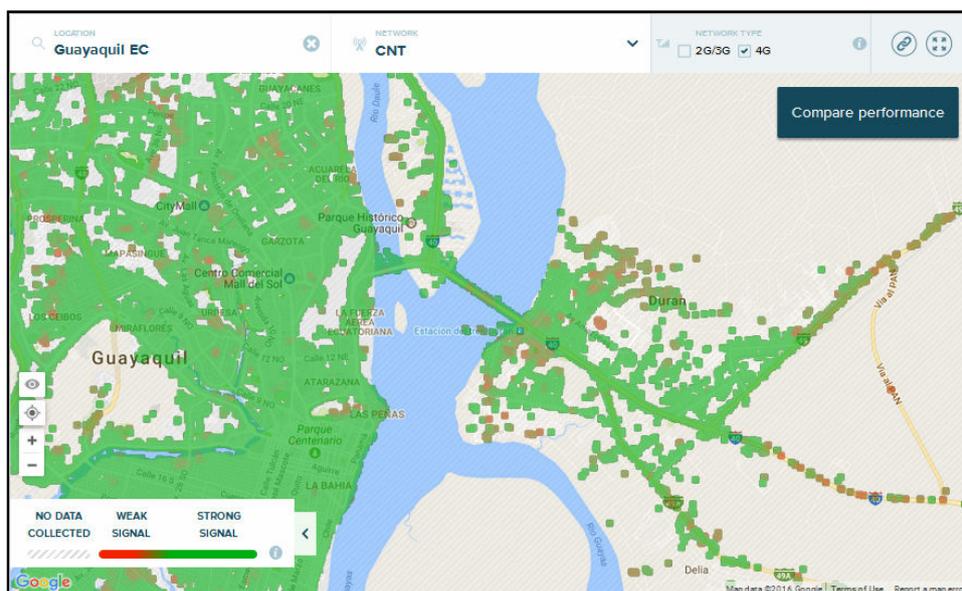


Figura 4.7. Cobertura LTE, Operadora CNT – OpenSignal – 22-Nov-2016

Fuente: [38]

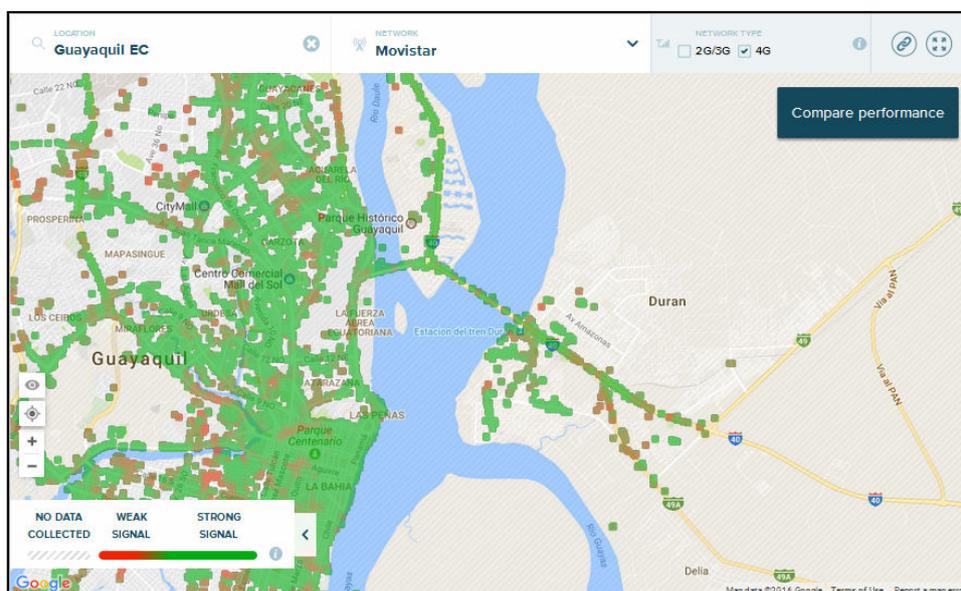


Figura 4.8. Cobertura LTE, Operadora Movistar - OpenSignal – 22-Nov-2016

Fuente: [38]

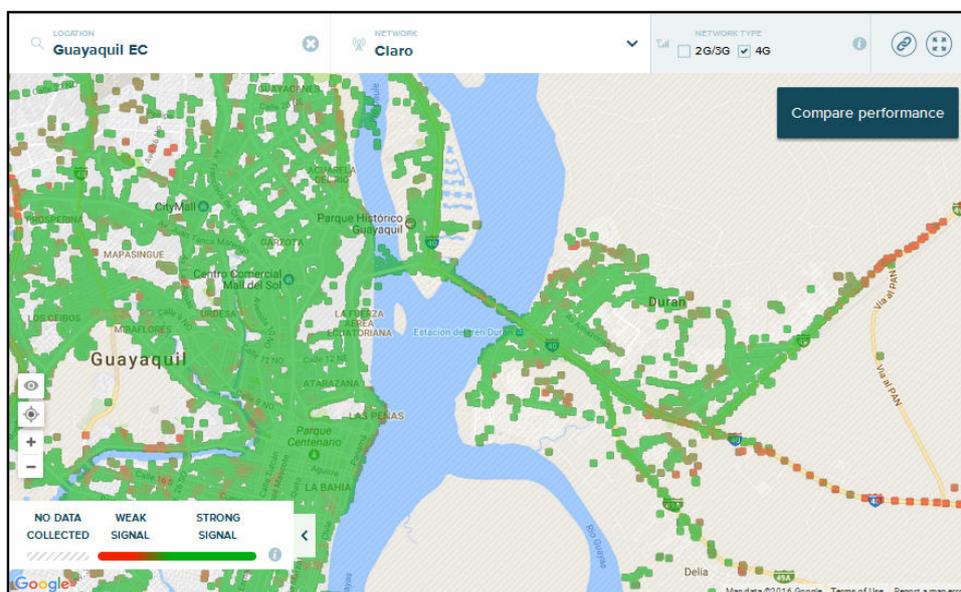


Figura 4.9. Cobertura LTE, Operadora Claro - OpenSignal – 22-Nov-2016

Fuente: [38]

Rápidamente podemos concluir de manera visual que la red de Movistar durante esta evaluación tuvo mayor número de muestras en el rango de -118 dB, en comparación a las redes de CNT y Claro,

esta premisa se comprueba utilizando el cuadro de evaluación de desempeño proporcionado por OpenSignal, mostrado en la Figura 4.10.

OPERATOR	DOWNLOAD (Mbps)	UPLOAD (Mbps)	LATENCY (ms)	SIGNAL
Showing data only for: 4G				
 Claro	31.9	4.4	64	
 Movistar	29.2	5.2	52	
 CNT	20.6	6.1	64	

Figura 4.10. Comparación de desempeño – OpenSignal

Fuente: [38]

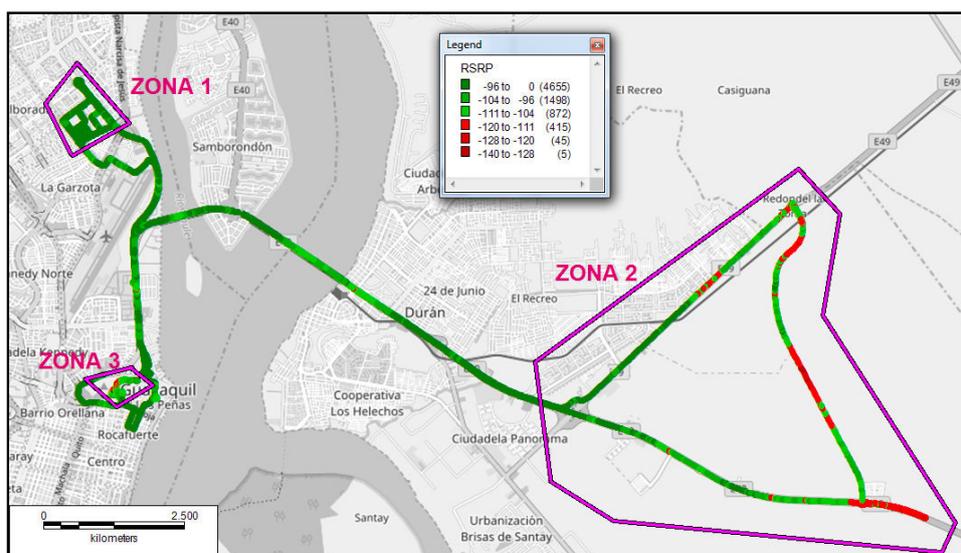


Figura 4.11. Definición de Zonas a Evaluar vs RSRP

En conclusión, usando la información de OpenSignal, al comparar las tres operadoras, se ubica en primer lugar a la red LTE de Claro, aunque tiene la misma cobertura que LTE CNT, sin embargo LTE Claro posee mejores promedios de Throughput de descarga en enlace descendente.

En la *sección 2.1.1* se detalló la propuesta de las zonas a evaluar, las cuales se dividieron en tres partes de acuerdo a sus características, en la Figura 4.11 se muestra el resumen de la división zonal para el análisis vs la cobertura de red LTE (RSRP).

Las mediciones de este trabajo fueron ejecutadas sobre la red LTE de CNT, al comparar la Figura 4.7 con la Figura 4.11 se observa similitud de las zonas de mala cobertura de esta red. Para obtener estos gráficos se hizo uso de la Herramienta GIS Mapinfo en conjunto con Open Street Maps [39], [40].

A continuación el siguiente análisis busca encontrar una correlación entre RSRP y los parámetros de QoS de VoIP en las zonas de análisis 2 y 3 debido a que en estas se detectaron los niveles más bajos de RSRP. La zona 1 no se incluye en el análisis debido a que los niveles de cobertura RSRP son muy buenos (mayores a -95 dBm).

- Análisis de zona 2

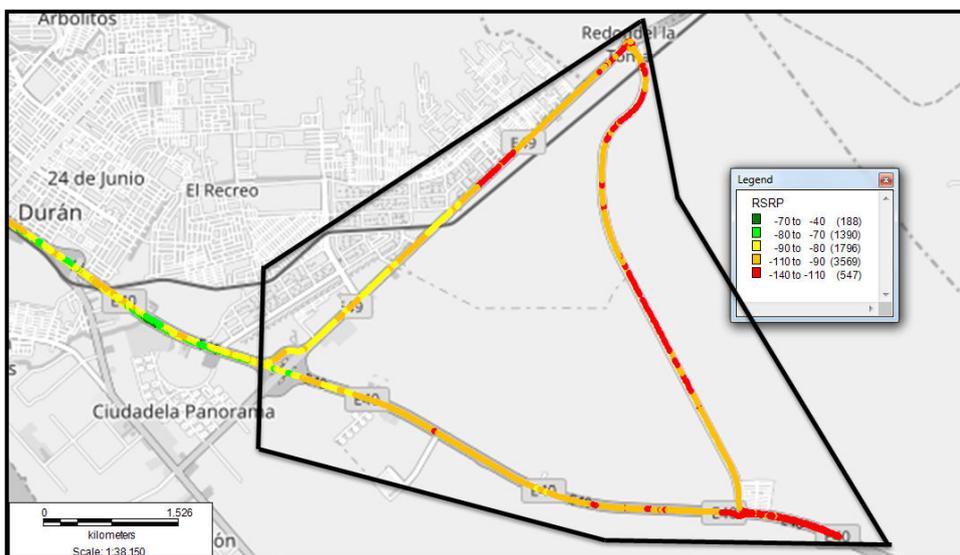


Figura 4.12. Zona 2: RSRP menores a -110dBm

El área mostrada en la Figura 4.12 corresponde a la zona 2, la cual contiene muestras con niveles de cobertura menores a -110 dBm, para los cuales es deseable medir el desempeño de VoIP.

En la Figura 4.13 se muestra los niveles de RSRP en función del tiempo, luego del análisis realizado se incluye la Tabla 11 con el resumen de estadísticas donde se observa el valor mínimo alcanzado durante esa prueba fue de -136.12 dBm.

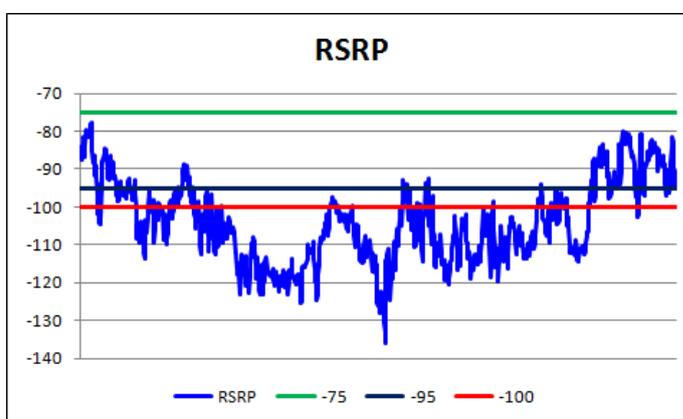


Figura 4.13. RSRP Zona 2

Estadística	RSRP	Tiempo
Min.	-136.12	5:08:14 PM
Máx.	-77.80	5:25:44 PM
Prom.	-104.10	---
Med.	-104.98	---
Std	10.79	---

Tabla 11. Resumen RSRP Zona 2

En la Tabla 11 se incluye un resumen de los valores obtenidos durante el análisis de la Figura 4.13.

A continuación se incluye un análisis del desempeño IP en el servidor, como observación, debido a la extensa cantidad de logs capturados, se filtran los logs que pertenezcan al rango de tiempo de medición, los cuales son: desde 5:07PM hasta 5:27PM.

El resultado que se muestra en la Figura 4.14 incluye la información de flujo de paquetes en función del tiempo.

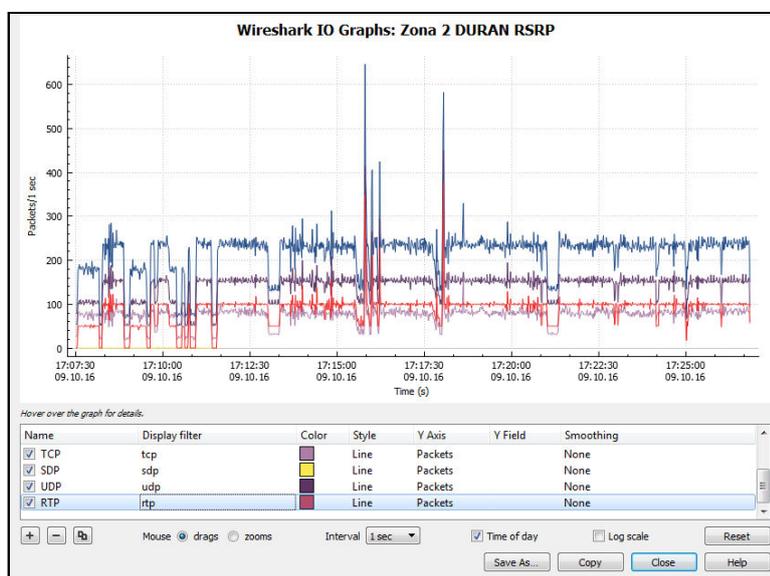


Figura 4.14. IO Graph RSRP Zona 2

Protocolo	Flujo Promedio Paquete/Seg
<i>Todos los paquetes</i>	241
<i>UDP</i>	152
<i>RTP</i>	100
<i>TCP</i>	81
<i>SDP</i>	6

Tabla 12. Resumen Flujo de Paquetes

De la Figura 4.14 podemos obtener las siguientes conclusiones:

- Mientras la llamada de VoIP está en curso, se observan períodos de flujo constante de paquetes IP, de acuerdo a su protocolo. El flujo promedio de la totalidad de paquetes capturados es de aproximadamente 241 Paquetes/s.
- Para obtener el flujo de paquetes por protocolo usamos los filtros por defecto de Wireshark. En la Tabla 12 se detallan los

promedios aproximados de los flujos de paquetes para cada protocolo durante un periodo constante.

En conclusión, el flujo de paquetes por protocolo tiene concordancia con el tipo de servicio que se está ejecutando. VoIP utiliza SDP para fijar puertos, direcciones, CODEC, luego transporta la información multimedia en RTP, lo cual viaja encapsulado en paquetes UDP. En la sección ANEXOS se incluye como ejemplo, la información capturada de paquetes SDP/SIP, RTP y UDP.

Debido a la característica de UDP: transmisión sin conexión, no se utiliza ningún método para verificar errores, por lo tanto se dificulta el proceso de verificar errores de UDP y pérdida de paquetes, por este motivo la principal herramienta de Wireshark para analizar problemas de QoS en el entorno IP será el flujo de paquetes por protocolo y las gráficas obtenidas con Wireshark IO Graph.

De la información capturada se analizan los siguientes eventos, los cuales se grafican en la Figura 4.15.

1. Flujo RTP igual a 0.
2. Reducción de flujo promedio de RTP.
3. Picos de incremento de Flujo de Paquetes RTP.

La Tabla 13 muestra en resumen los eventos de interés observados en la Figura 4.15, y se detallan los rangos de tiempo en que aparecen.

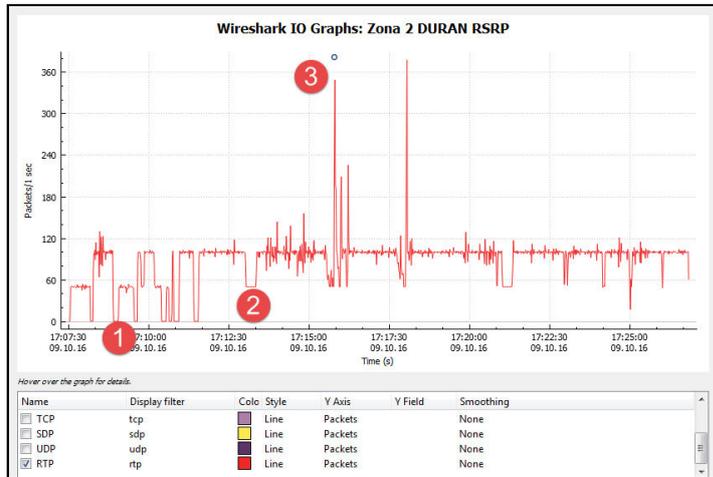


Figura 4.15. Flujo RTP vs eventos Zona 2

No.	Evento	Tiempo
1	$RTP = 0$	17:10:24 – 17:10:32 17:10:38 – 17:10:41 17:10:47 – 17:10:56
2	$0 < RTP < 100^*$	17:13:00 – 17:13:20 17:21:00 – 17:21:20 17:15:32 – 17:15:46
3	$RTP > 100^*$	17:15:47 – 17:15:48 17:18:00 – 17:18:05

Tabla 13. Resumen de Eventos Zona 2

*Se utilizó como referencia el flujo promedio de paquetes RTP, Tabla 12.

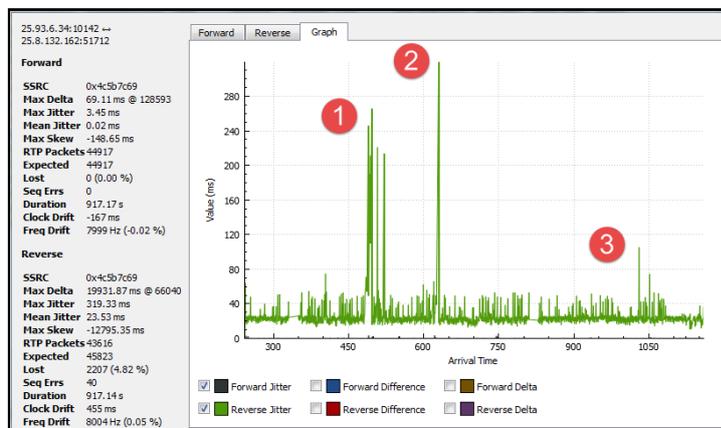


Figura 4.16. RTP Forward - Reverse Jitter Zona 2

- Análisis de Flujo RTP

Del análisis del flujo RTP utilizando la herramienta de Wireshark: `Telephony -> RTP -> RTE Stream` obtenemos las Figuras 4.16, 4.17 y 4.18.

En la Figura 4.16, se muestra los puntos 1, 2, y 3 donde se observan picos de aumento de jitter, de aproximadamente 250, 320 y 110ms respectivamente, esto en comparación al jitter promedio de 23.53ms. Esta variación se detecta en el flujo de reversa, es decir del lado del dispositivo móvil.

Para la Figura 4.17, se muestran los puntos 1, 2, y 3 donde se observan picos de aumento de diferencia de llegada de paquetes. Para RTP, Difference o Diferencia explica la relación entre la llegada de paquetes y el TimeStamp de RTP. Es decir que se trata de la diferencia absoluta de la llegada del paquete en la interfaz de captura donde fue generada la estampa de tiempo, versus el tiempo esperado de llegada del paquete en la interfaz de captura, basado en la estampa de tiempo RTP [41].

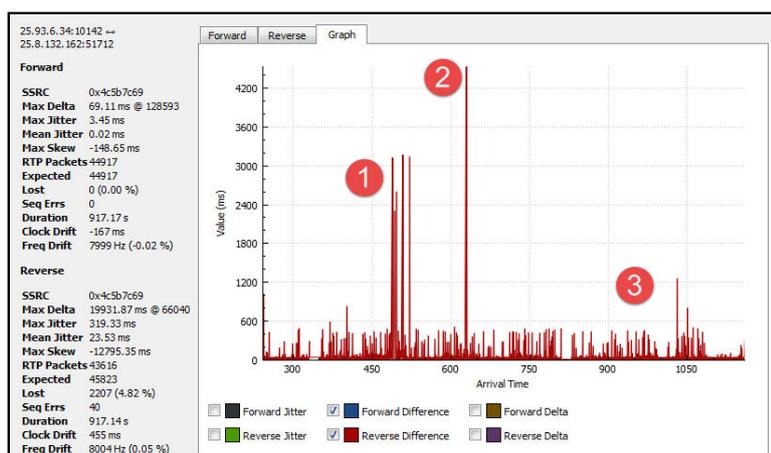


Figura 4.17. RTP Forward - Reverse *Difference* Zona 2

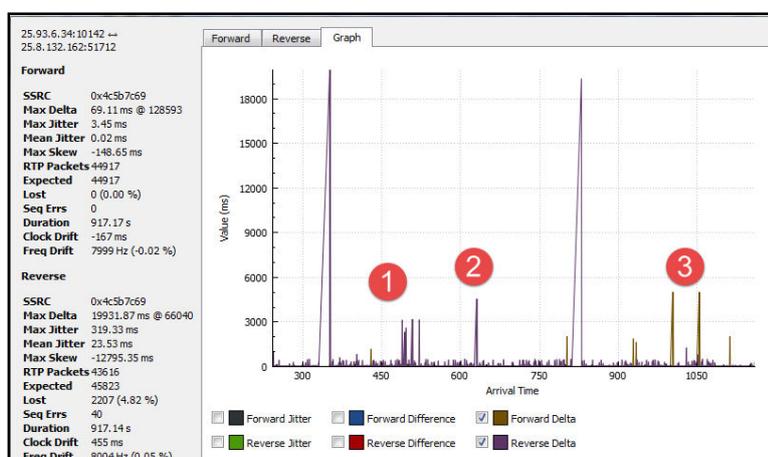


Figura 4.18. RTP Forward - Reverse Delta Zona 2

En cambio el Delta muestra la diferencia de tiempo entre la llegada del paquete vs el paquete anterior [41].

La Figura 4.18 muestra el delta de tiempo entre el paquete actual y el paquete posterior, se incluyen 3 marcas para su análisis.

Marca	Paquete No.	Tiempo	Jitter ms
1	129846	17:18:01.33	319.33
2	97610	17:15:40.09	245.72
3	221742	17:24:40.75	105.41

Tabla 14. Resumen de Puntos de análisis Jitter Zona 2

En la Tabla 14 se incluye un resumen de jitter, con información de tiempo para la zona de análisis 2, con esta información se realiza una correlación con los parámetros de Radio Frecuencia recibidos en la red LTE.

La Figura 4.19 se obtiene al graficar simultáneamente las marcas de tiempo de la Tabla 14, versus los valores de RSRP obtenidos en función del tiempo. Del análisis se observa que la cobertura cae a valores límites donde según el estándar, no se asegura el servicio

de LTE, sin embargo el Jitter se mantiene constante la mayor parte del tiempo, solo se observaron 3 picos de degradación, mayores al promedio.

Para la Figura 4.20 se muestra la correlación entre los 3 diferentes tipos flujos RTP mostrados en la Figura 4.15, de lo que podemos concluir que existe intermitencia en el Flujo RTP. Hay que destacar que existe relación directa entre los picos de jitter y los picos de flujo RTP (Flujo RTP >100).

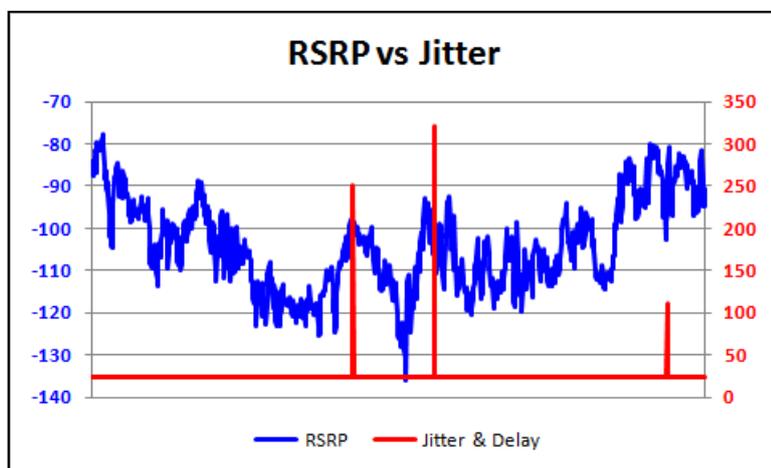


Figura 4.19. RSRP vs Jitter Zona 2

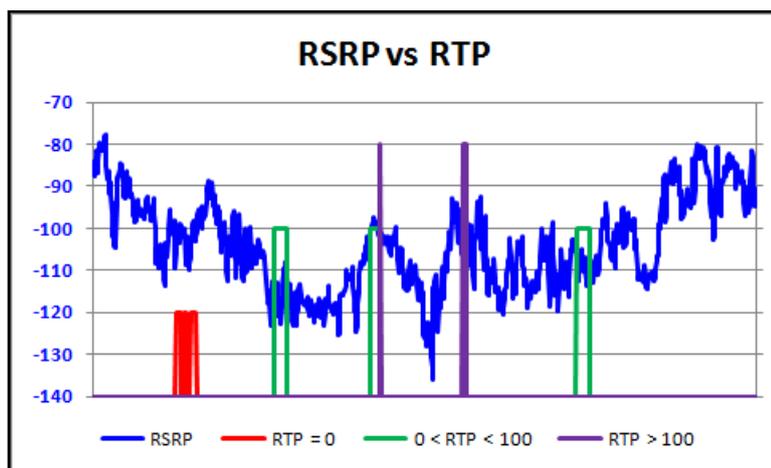


Figura 4.20. RSRP vs Flujo RTP Zona 2

- Análisis de zona 3

Se realiza el mismo análisis en la zona 3, se debe recordar que es una zona alta, es de ubicación central. Existe un punto de la zona 3 que se observa con mala cobertura en la página OpenSignal, de igual manera esta información se confirma con los datos obtenidos durante las pruebas de servicio.

En la Figura 4.21 se observan los valores de RSRP percibidos por el teléfono móvil, se puede constatar valores menores a -120 dBm cerca al monumento Corazón de Jesús, principal mirador del Cerro del Carmen.

En la Figura 4.22 se pueden observar que los niveles de RSRP están muy por debajo del umbral de -100 dBm, con picos de hasta -120 dBm.

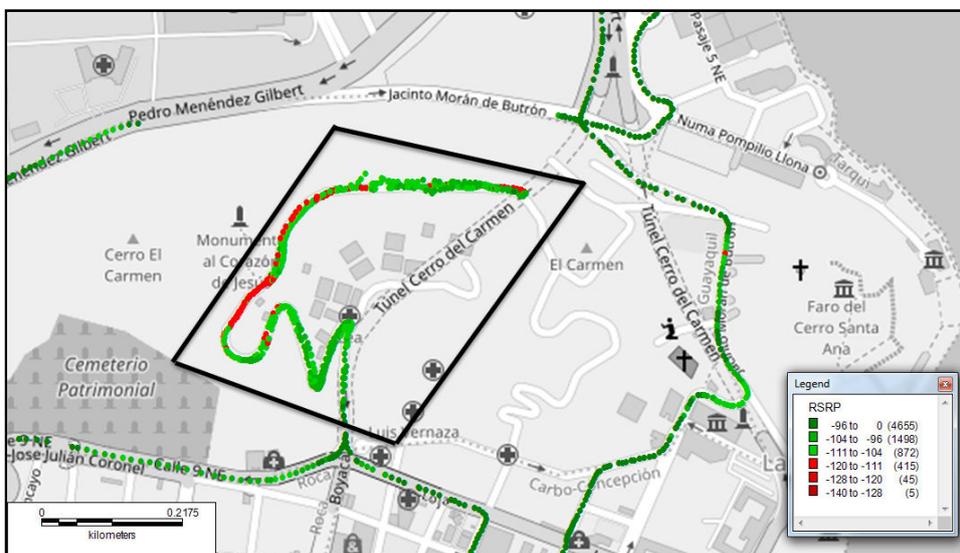


Figura 4.21. Zona 3: RSRP menores a -110dBm

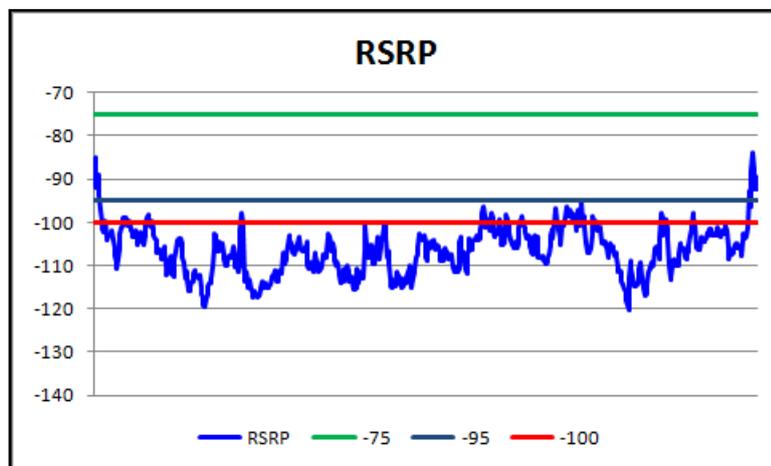


Figura 4.22. RSRP Zona 3

La Tabla 15 hace un resumen de los valores de RSRP para la zona 3, donde se observa que el valor mínimo alcanza a -120.25 dBm. Se incluye una marca de tiempo para su posterior análisis.

Estadística	RSRP	Tiempo
Min.	-120.25	9:40:04 PM
Máx.	-83.99	9:52:02 PM
Prom.	-106.48	---
Med.	-106.28	---
Std	5.57	---

Tabla 15. Resumen RSRP Zona 3

Adicional al método fijado para la recolección de información y ejecución de pruebas, durante la captura de información IP en el servidor se agregó el filtro de captura UDP en Wireshark, de esta forma se reduce el tamaño de los archivos de captura, facilitando su posterior análisis. Sin embargo debido a que ahora disponemos de logs más extensos utilizamos el filtro por fechas para analizar únicamente la información en la zona de interés. Para este caso de la Tabla 15 obtenemos el tiempo mínimo y máximo, con esta información se procede a filtrar en Wireshark de la siguiente manera:

```
(frame.time >= "Oct 09, 2016 21:40:04") &&
(frame.time <= "Oct 09, 2016 21:52:02")
```

Luego realizamos el siguiente procedimiento para exportar la información filtrada:

Ctrl+Shift+M: para marcar todos los paquetes filtrados y **File -> Export Specified Packets**, para crear un nuevo proyecto que contenga únicamente la información filtrada.

En la Figura 4.23 se delimita el instante de tiempo que requiere análisis, desde las 21:40 hasta las 21:52 horas.

En las Figuras 4.24 y 4.25 marcamos las zonas de interés, debido a la variación de flujos de RTP, UDP y SDP, para proceder con su posterior análisis.

En la Tabla 16 se resumen los puntos de interés, el tipo de evento observado y las marcas de tiempo correspondientes.

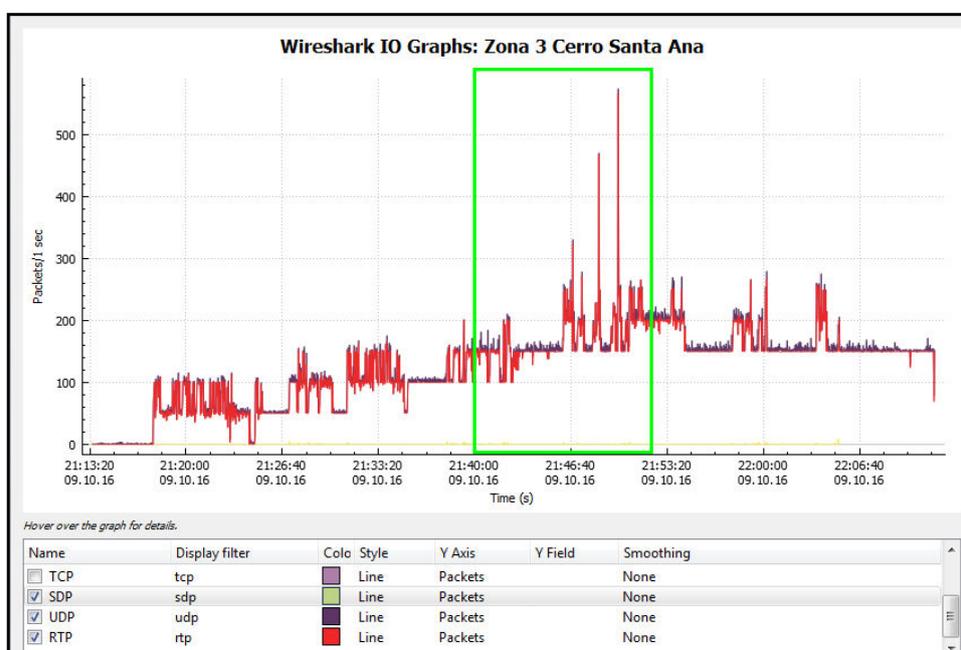


Figura 4.23. Flujo RTP vs eventos Zona 3

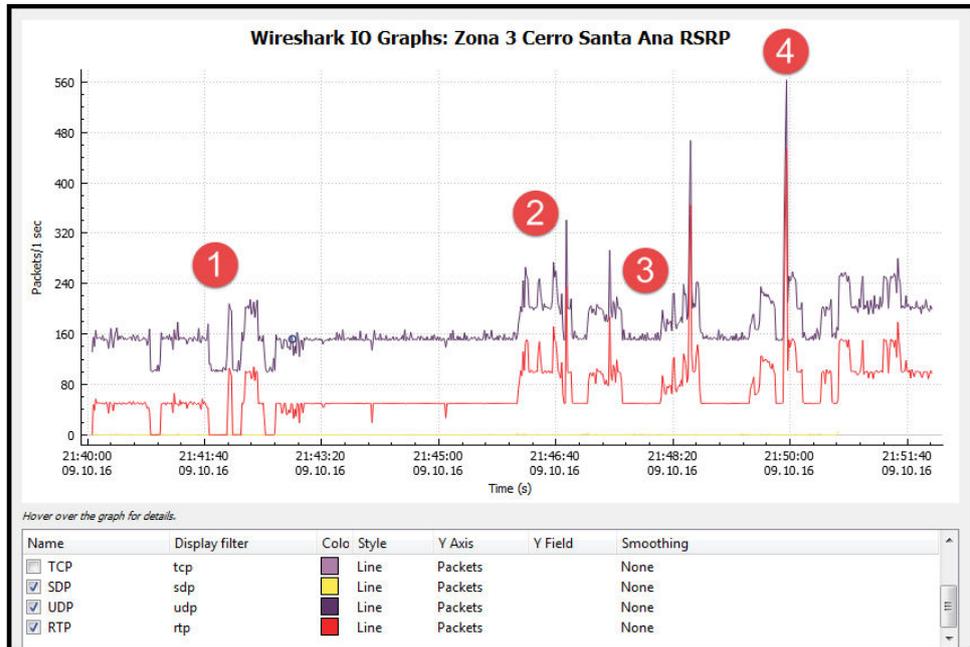


Figura 4.24. Flujo RTP & UDP Zona 3

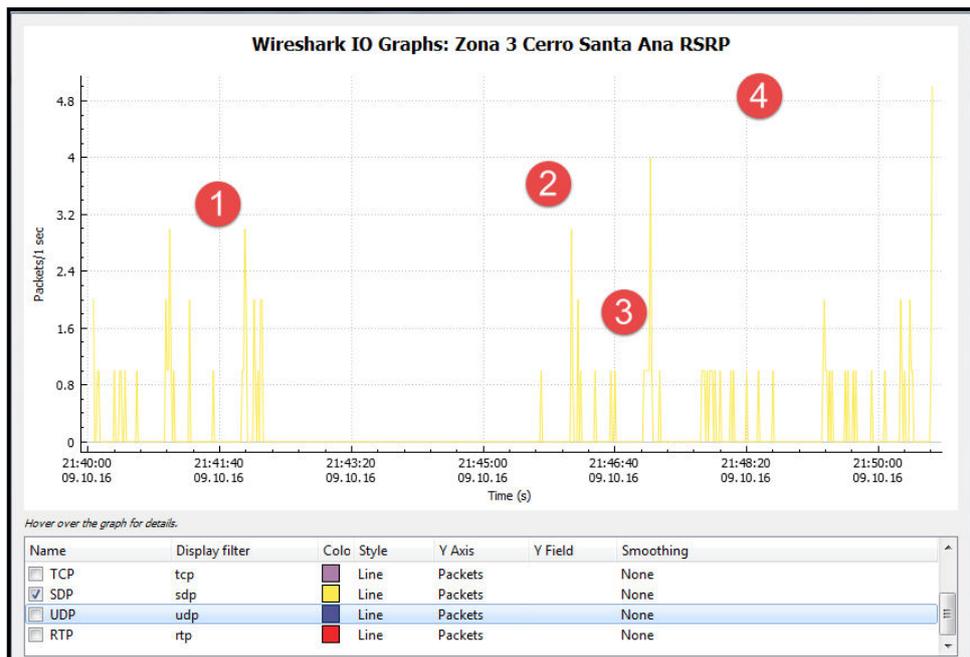


Figura 4.25. Flujo SDP Zona 3

No.	Evento	Tiempo
1	$RTP = 0$	21:40:54 – 21:41:02 21:41:44 – 21:41:56 21:42:32 – 21:42:40
3	$0 < RTP < 100$	21:42:40 – 21:46:10 21:46:54 – 21:47:10 21:47:36 – 21:48:08 21:48:40 – 21:49:30
2, 4	$RTP > 100$	21:46:14 – 21:46:16 21:46:26 21:46:37 – 21:46:40 21:46:48 – 21:46:49 21:47:25 – 21:47:26 21:48:34 – 21:48:36 21:49:57

Tabla 16. Resumen de Eventos Zona 3

En la Figura 4.26 se analizan los eventos de VoIP, se ordena de mayor a menor por el Jitter calculado por la herramienta.

Luego de escoger las trazas a analizar, obtendremos la información de número de datagrama. Esta información la podemos constatar en la Figura 4.27.

Source Address	Source Port	Destination Address	Destination Port	SSRC	Payload	Packets	Lost	Max Delta (ms)	Max Jitter	Mean Jitter	Status
25.8.132.162	64458	25.93.6.34	13768	0x600fec96	Unassigned	1878	354 (15.9%)	7420.087	587.165	33.945	*
25.8.132.162	64458	25.93.6.34	14922	0x43dc7c3a	Unassigned	2259	14 (0.6%)	2821.807	201.916	25.109	*
25.8.132.162	64458	25.93.6.34	14012	0xf2c2c8	Unassigned	1566	49 (3.0%)	600.964	72.636	26.187	*
25.8.132.162	64458	25.93.6.34	19300	0xd6073f2	Unassigned	3909	89 (2.2%)	758.843	68.260	23.260	*
25.8.132.162	64458	25.93.6.34	14212	0xdc80f907	Unassigned	2386	45 (1.9%)	477.654	60.688	23.809	*
25.8.132.162	64458	25.93.6.34	18590	0x8622d477	Unassigned	1386	36 (2.5%)	511.626	56.235	24.129	*
25.8.132.162	64458	25.93.6.34	16210	0x46a089d8	Unassigned	931	22 (2.3%)	558.206	55.547	25.157	*
25.8.132.162	64458	25.93.6.34	16354	0x65ed19c9	Unassigned	436	17 (3.8%)	511.169	51.883	23.187	*
25.8.132.162	64458	25.93.6.34	13578	0xbcf42a2f	Unassigned	2023	22 (1.1%)	411.803	45.883	23.042	*
25.8.132.162	64458	25.93.6.34	13870	0x930ce03d	Unassigned	173	0 (0.0%)	395.321	45.150	25.255	*
25.93.6.34	14012	25.8.132.162	64458	0x3b1602cd	g711U	298	0 (0.0%)	79.842	4.022	0.262	*
25.93.6.34	16210	25.8.132.162	64458	0x99bd6c2	g711U	28355	0 (0.0%)	49.753	2.393	0.025	*
25.93.6.34	14922	25.8.132.162	64458	0x7be79738	g711U	481	0 (0.0%)	20.238	1.286	0.094	*
25.93.6.34	13768	25.8.132.162	64458	0x7d6fd411	g711U	1040	0 (0.0%)	21.088	0.970	0.038	*
25.93.6.34	19300	25.8.132.162	64458	0x116850c1	g711U	1221	0 (0.0%)	20.390	0.968	0.051	*
25.93.6.34	13870	25.8.132.162	64458	0x305f9ffe	g711U	185	0 (0.0%)	21.123	0.109	0.041	*

Figura 4.26. RTP Streams Zona 3

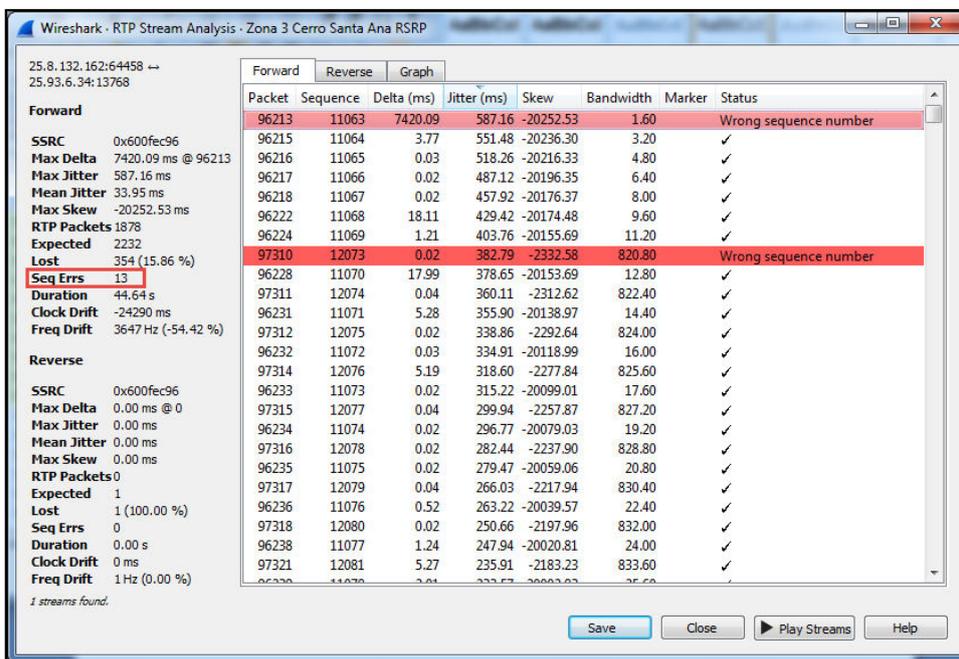


Figura 4.27. RTP Stream Analysis Zona 3

Marca	Paquete No.	Tiempo	Max Jitter ms
1	96213 – 96224	21:49:55.35 – 21:49:55:38	587.16
2	62899 – 62932	21:46:49.21 – 21:46:49.24	201.92
3	78937- 78943	21:48:20.39 – 21:48:20.39	72.64

Tabla 17. Resumen de Puntos de análisis Jitter Zona 3

Luego de obtener la información relevante de Jitter y número de datagrama de la Figura 4.27, procedemos a localizar los paquetes implicados y establecer su marca de tiempo, esto se detalla en la Tabla 17.

Se recomienda usar la orden *Ctrl+G* para ir al paquete deseado de acuerdo al número, esto con el fin de detectar el tiempo en que fue capturado.

Al igual que el análisis realizado en la Zona 2, la Figura 4.28 muestra la correlación obtenida entre el RSRP y el Jitter de la Tabla 17, donde se comprueba que la mayor degradación de Jitter ocurrió en el mismo instante en que la cobertura LTE representada por los valores de RSRP cae a su valor mínimo de -120.25 dBm.

La Figura 4.29 establece una correlación entre la cobertura LTE representada por el RSRP y los flujos RTP calculados en la Tabla 16.

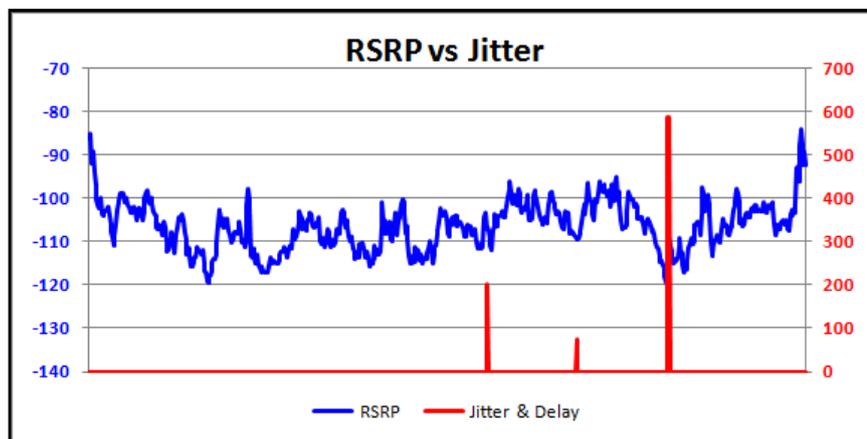


Figura 4.28. RSRP vs Jitter Zona 3

En resumen, el análisis de flujo RTP que nos interesa es cuando RTP=0 que quiere decir que no se está transmitiendo información, no hay una conexión establecida entre el Usuario y el Servidor VoIP. Flujo RTP mayor a 100 o al promedio calculado quiere decir que existe algún problema de QoS, que para nuestro análisis coincide con los picos de Jitter. Este análisis se observa en la Figura 4.29.

Finalmente en la Figura 4.30 se superpone las muestras RSRP tomadas de la zona 2 y la zona 3 con el fin de comparar la cobertura entre las 2 zonas, de lo que podemos concluir que efectivamente la zona 2 presenta picos de menor cobertura pero sin embargo experimentó menor cantidad de degradación de parámetros de QoS en VoIP.

Análisis de Evento: en la Figura 4.31 analizamos la llamada que se encuentra en estado IN CALL observado en la zona 3.

Como se puede apreciar, los eventos de llamadas se ordenan en función del tiempo de inicio. Durante las pruebas realizadas, cada vez que ocurría un evento de desconexión de la llamada, la persona que realizaba las pruebas establecía una nueva llamada, esto lo hacía manualmente marcando a la extensión 111, la cual fue designada para la ejecución de la aplicación de Asterisk *SayNumber*.

Por lo tanto luego de analizar la información capturada por Wireshark en el servidor, se esperaría que todas las llamadas en secuencia terminen con el estado *COMPLETED*. Sin embargo este evento esperado no sucede y para el análisis realizado, la llamada permanece en estado *IN CALL*.

En la Figura 4.32 se muestra la mensajería SIP para la llamada con estatus *IN CALL*.

Por lo tanto lo que podemos apreciar es que después de la desconexión de la llamada, por problemas existentes en la red LTE, lo que en realidad sería desconexión del servicio de LTE, no existió una desconexión en el servidor VoIP, nunca se recibe el mensaje BYE para terminar la sesión, los recursos no se liberan y el programa sigue funcionando.

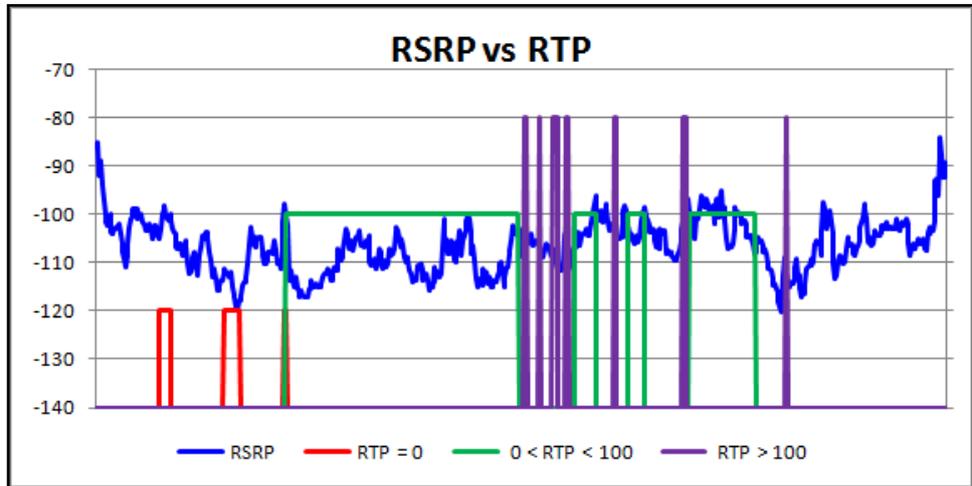


Figura 4.29. RSRP vs Flujo RTP Zona 3

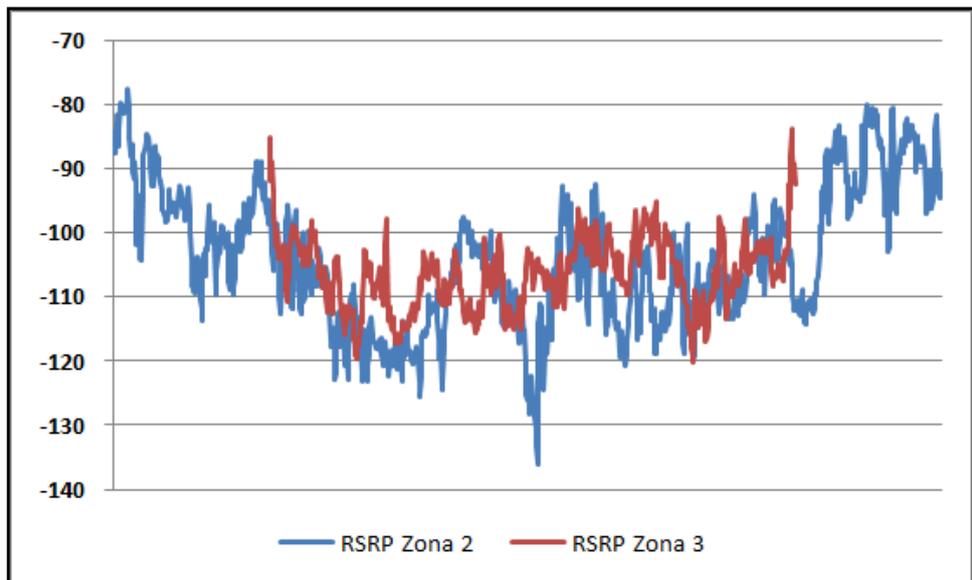


Figura 4.30. Comparativa RSRP Zona 2 vs Zona 3

Start Time	Stop Time	Initial Speaker	From	To	Protocol	Packets	State	Comments
55.423183	102.668293	25.8.132.162	< sip:WILLILTE@25.93.6.34;transport=UDP	< sip:1111@25.93.6.34;transport=UDP	SIP	25	COMPLETED	INVITE 401 200 200 200 200 200 200
113.578080	127.377475	25.8.132.162	< sip:WILLILTE@25.93.6.34;transport=UDP	< sip:1113@25.93.6.34;transport=UDP	SIP	21	COMPLETED	INVITE 401 200 200
122.352650	128.883002	25.8.132.162	< sip:WILLILTE@25.93.6.34;transport=UDP	< sip:1113@25.93.6.34;transport=UDP	SIP	14	IN CALL	INVITE 401 200 200
340.365453	370.183868	25.8.132.162	< sip:WILLILTE@25.93.6.34;transport=UDP	< sip:1111@25.93.6.34;transport=UDP	SIP	11	REFJECTED	INVITE 401 401 401 401 401 401 401 401
363.422628	413.411395	25.8.132.162	< sip:WILLILTE@25.93.6.34;transport=UDP	< sip:1111@25.93.6.34;transport=UDP	SIP	21	COMPLETED	INVITE 401 200 200 200 200 200 200
418.601922	455.372028	25.8.132.162	< sip:WILLILTE@25.93.6.34;transport=UDP	< sip:1111@25.93.6.34;transport=UDP	SIP	24	COMPLETED	INVITE 401 200 200 200 200 200
462.619658	538.522706	25.8.132.162	< sip:WILLILTE@25.93.6.34;transport=UDP	< sip:1111@25.93.6.34;transport=UDP	SIP	43	COMPLETED	INVITE 401 200 200 200
554.816746	620.315742	25.8.132.162	< sip:WILLILTE@25.93.6.34;transport=UDP	< sip:1111@25.93.6.34;transport=UDP	SIP	35	COMPLETED	INVITE 401 200 200 200 200 200 200
613.271360	636.639677	25.8.132.162	< sip:WILLILTE@25.93.6.34;transport=UDP	< sip:1111@25.93.6.34;transport=UDP	SIP	30	COMPLETED	INVITE 401 401 401 200
636.846146	638.286001	25.8.132.162	< sip:WILLILTE@25.93.6.34;transport=UDP	< sip:1111@25.93.6.34;transport=UDP	SIP	12	IN CALL	INVITE 401 200 200

Figura 4.31. VoIP Calls Zona 3

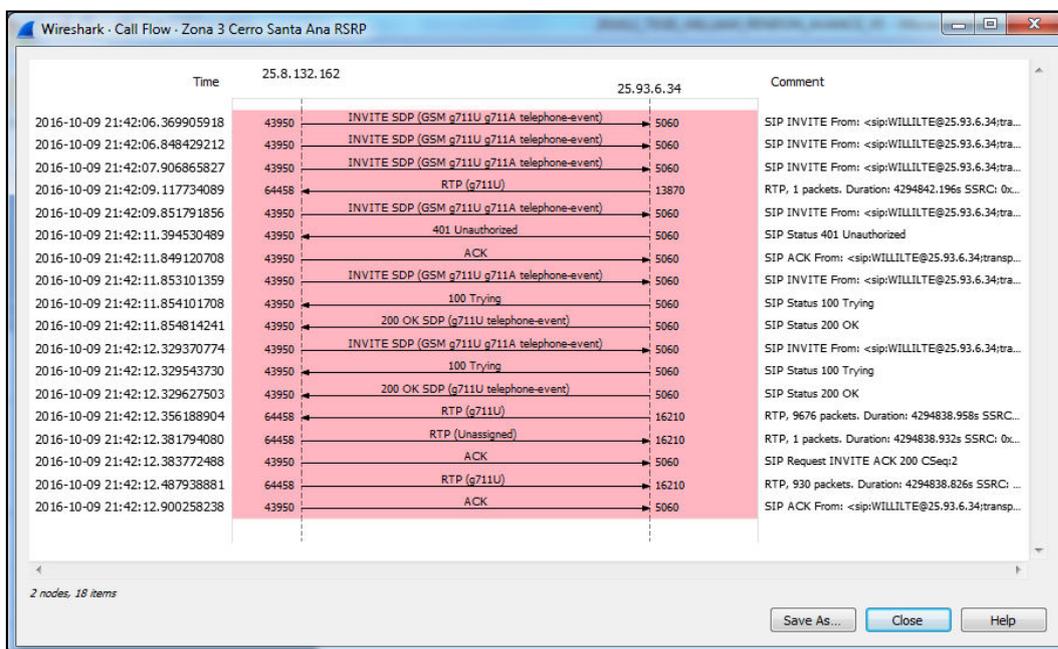


Figura 4.32. Flujo de llamada VoIP Zona 3

4.2.2. Análisis de calidad de señal vs. QoS

Para este trabajo de investigación definimos la calidad de la señal LTE como RSRQ en la *sección 2.2.2*, en resumen el RSRQ es a relación señal a Ruido del sistema radiante. A continuación de acuerdo al camino evaluado fijamos las zonas donde existe degradación de calidad de Señal, esto con el objetivo de evaluar el comportamiento del servicio de VoIP.

Según la Figura 4.33, en las zonas 2 y 3 son notorias las muestras de -16 a -40 dB de RSRQ, lo que quiere decir que están en el peor rango de Calidad.

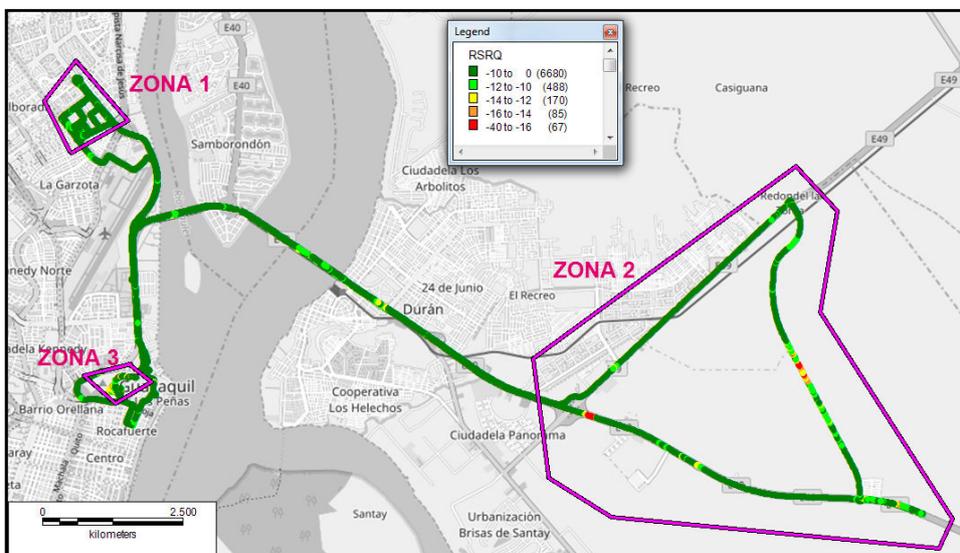


Figura 4.33. Definición de Zonas a Evaluar vs RSRQ

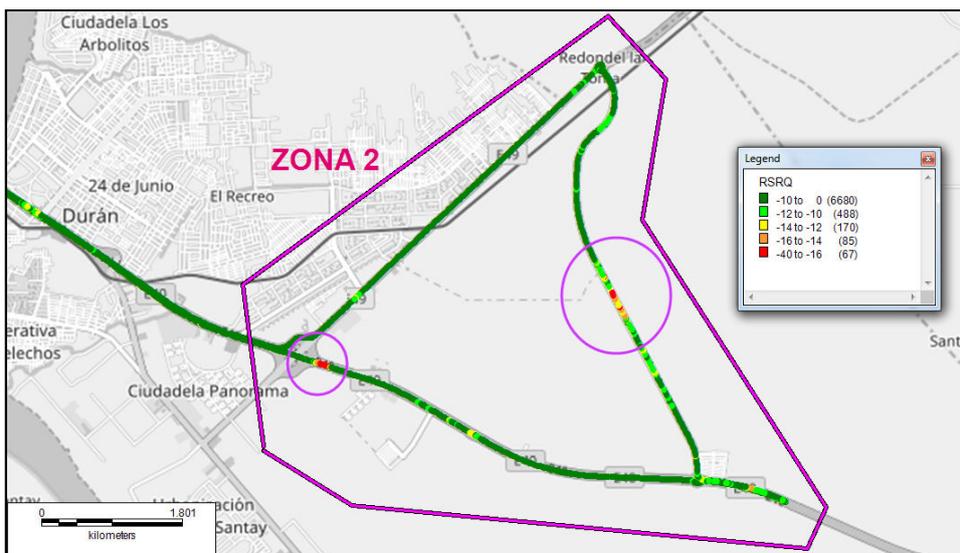


Figura 4.34. Zona 2: Delimitación RSRQ menores a -16 dB

En la Figura 4.34, se encierran las 2 áreas pertenecientes a la zona 2, en la que se observa mayor degradación de RSRQ, para lo cual se realiza el análisis en función de los parámetros de QoS para VoIP, para este proceso, separamos las muestras de LTE, con las cuales obtendríamos la información de tiempo inicial y final en LTE, dicha información será usada para crear un filtro en Wireshark y exportar el

mismo rango de tiempo, con el comportamiento de VoIP, para su posterior análisis.

Para la zona 3 se realiza el mismo proceso, como detalle se observa en la Figura 4.35 que para la misma zona de evaluación hay valores muy buenos y al mismo tiempo valores degradados de RSRQ, esto se debe a que el dispositivo móvil de LTE estuvo conectado a distintas celdas servidoras en la misma zona, por lo que concluimos que en esa zona no existe servidor definido o servidor dominante.

4.2.3. Análisis de Throughput vs. QoS

La Figura 4.36 muestra la definición de las zonas a evaluar y los promedios de throughput en enlace descendente obtenidos durante todo el recorrido en capa física, el mayor porcentaje de muestras se encuentra en el rango de 256 a 512 Kbps aun cuando se realiza una llamada de voz, esto se debe a la característica de VoIP.

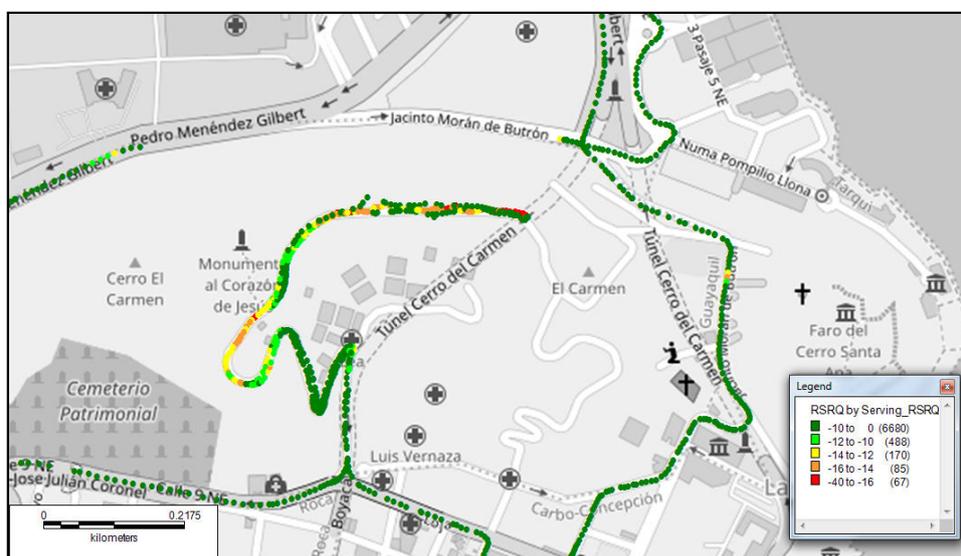


Figura 4.35. Zona 3: Delimitación RSRQ menores a -16 dB

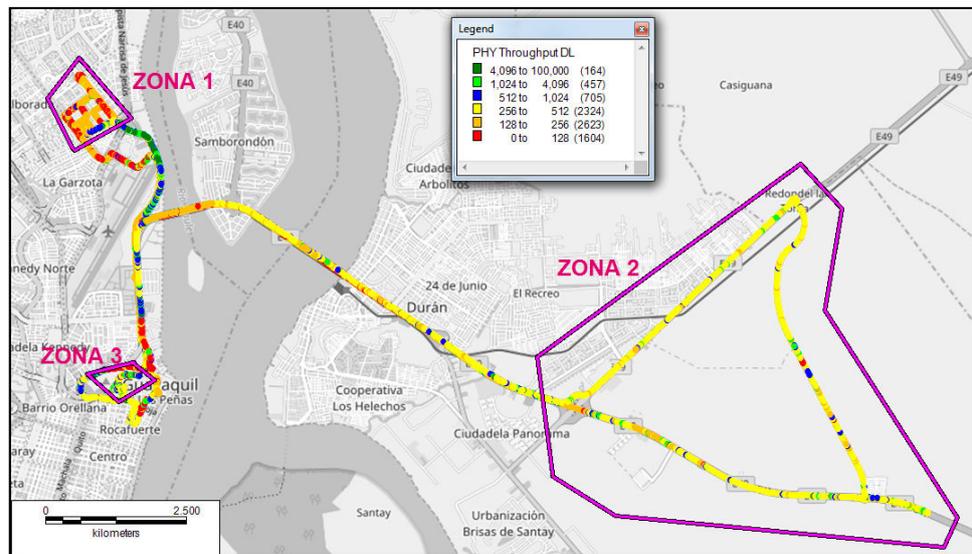


Figura 4.36. Definición de Zonas a Evaluar vs Throughput enlace descendente

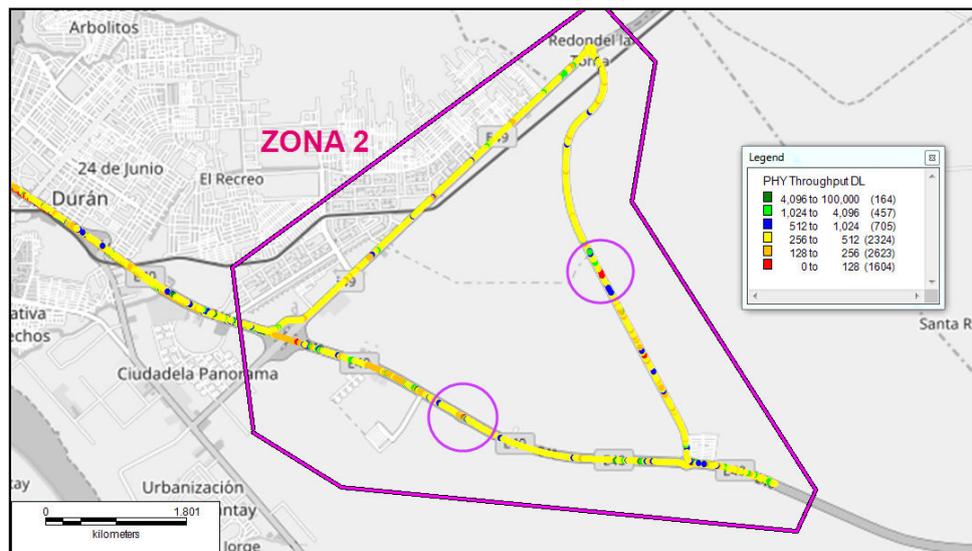


Figura 4.37. Zona 2: Delimitación Throughput enlace descendente menor a 128 Kbps

Para la Figura 4.37 se delimita la Zona 2 donde se registraron los peores niveles de cobertura, en la misma solo dos pequeñas zonas experimentaron valores en el peor rango, que es de 0 a 128 Kbps.

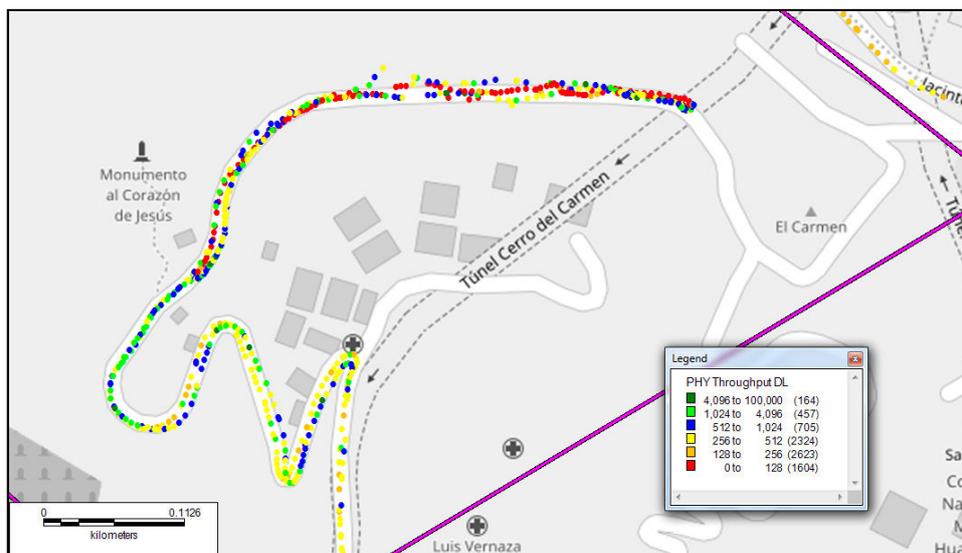


Figura 4.38. Zona 3: Delimitación Throughput enlace descendente menor a 128 Kbps

En la Figura 4.38 se muestra el throughput en enlace descendente para la zona del Cerro del Carmen, el mismo es directamente correlacionado a la calidad de señal, ya que existen zonas en que los valores se ubican en el rangos de 512 a 1024 Kbps y de 0 a 128 Kbps al mismo tiempo.

4.3. Estudio de QoS

Luego de las pruebas realizadas y los resultados obtenidos, podemos incluir un estudio de la Calidad de Servicio para las redes LTE y las redes VoIP, y su relación.

4.3.1. Análisis de flujo y pérdida de paquetes IP vs. Cobertura LTE

A continuación el análisis de correlaciones: se grafica el RSRP en función de si existe o no jitter o pérdida de paquetes.

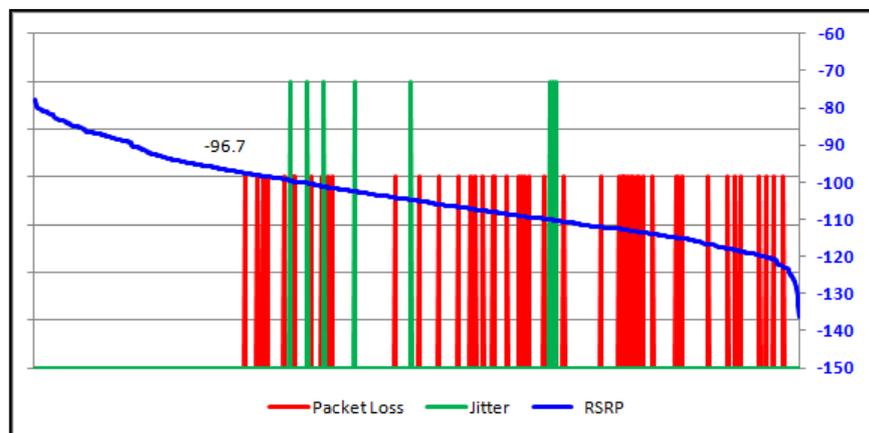


Figura 4.39. Zona 2, Punto de inflexión entre RSRP y pérdida de paquetes

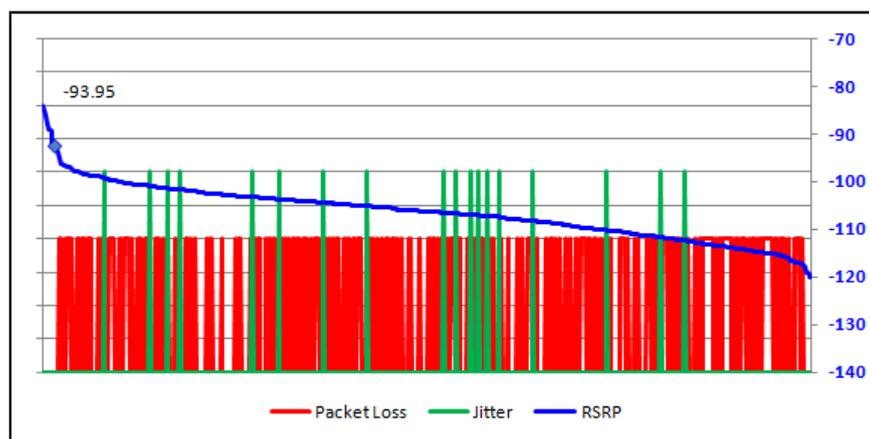


Figura 4.40. Zona 3, Punto de inflexión entre RSRP y pérdida de paquetes

En conclusión luego del análisis de correlaciones mostrado en las Figuras 4.39 y 4.40 se observa que a partir de valores de RSRP de aproximadamente -95dBm empieza a existir jitter y pérdida de paquetes.

4.3.2. Análisis de QoS de LTE en función de QoE de VoIP

El análisis de la QoE es un valor subjetivo. Para nuestro estudio se mantiene la subjetividad ya que nos basamos en la opinión de la persona que realiza la evaluación del servicio, sin embargo tenemos la ventaja de detectar que pasó en el instante que el servicio fue percibido como malo por el usuario, y esto en la mayoría de los casos se presentó debido a problemas de la QoS de LTE, como baja cobertura o mala calidad, lo que se traduce en desconexión del servicio de LTE y por consiguiente, pérdida de datagramas IP, aparición de Jitter,... lo que genera pérdida de la continuidad de la comunicación de VoIP. Por lo tanto podemos decir que existe una mala QoE, debido a problemas de QoS en LTE.

Esto se demostró mediante todos los experimentos realizados y con ayuda de la herramienta Wireshark, para todos los casos en que se encontró una secuencia de paquete errónea, picos altos de jitter o retrasos elevados, todos estos casos se dieron bajo malas condiciones de QoS de LTE (baja cobertura, mala calidad o ambas), y mientras se realizaba la prueba, la persona que evaluó el servicio pudo constatar la pérdida de la continuidad en la comunicación, la desconexión indefinida de la llamada y la aparición de distorsión en la calidad del audio con lo cual el audio se hacía indescifrable.

4.3.3. Análisis de pérdida de paquetes en función de cobertura

A continuación se pretende realizar un modelo matemático empírico basado en las mediciones cobertura de LTE, es decir en función del RSCP para el cual se pueda predecir el comportamiento de la pérdida de paquetes en VoIP.

No se trata de crear un modelo de predicción de cobertura LTE debido a que es un estudio totalmente distinto, además ya existen este tipo de modelos en base a mediciones y pérdidas como por ejemplo el modelo *Okumura-Hata* que es uno de los más utilizados.

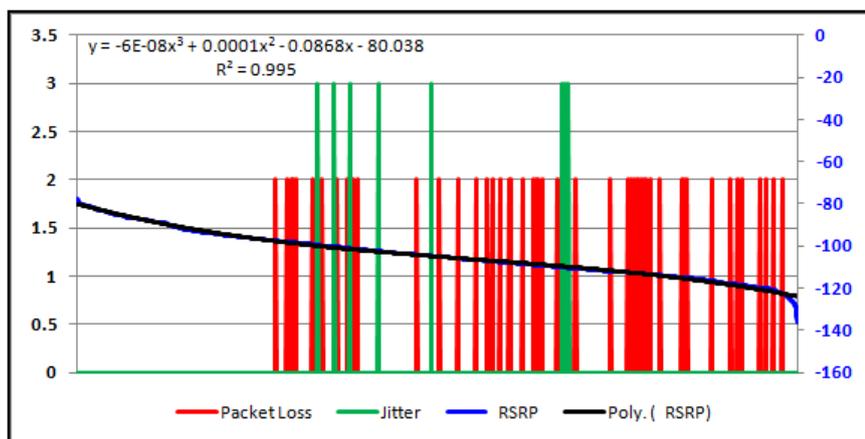


Figura 4.41. Línea de tendencia de RSRP vs Packet Loss

De la Figura 4.39 nos interesa el RSRP en función de la pérdida de paquetes. Al utilizar la funcionalidad de Excel para calcular la línea de tendencia de la gráfica, tendremos la aproximación al comportamiento observado, lo cual se muestra en la Figura 4.41, aproximando la tendencia de RSRP a una función polinómica de tercer orden.

La herramienta de Excel calcula la ecuación 4.1 como polinómica de tercer orden.

$$y = -6^{-8}x^3 + 0.0001x^2 - 0.0868x - 80.038 \quad (4.1)$$

Sin embargo se debe recordar que los valores de "x" son de tiempo y los valores de RSRP representados por "y" fueron previamente ordenados de mayor a menor por lo tanto el análisis propuesto no es válido, el objetivo no es calcular el RSRP en función del tiempo, más bien se requiere calcular a partir de qué valor comienza a aparecer pérdida de paquetes mayor a cero.

En las mediciones realizadas el punto de inflexión para el cual comienza a existir pérdida de paquetes, se fijó entre -93.95 y -96.7 dBm, lo que en promedio nos va un valor aproximado a -95 dBm.

Por lo tanto se propone establecer una relación de cobertura a pérdida de paquetes en base a -95 dBm como punto de inflexión, mostrado en la ecuación 4.2.

$$\begin{pmatrix} y > -95 \text{ dBm, RSRP} & \text{Packet Loss} = 0 \\ y \leq -95 \text{ dBm, RSRP} & \text{Packet Loss} > 0 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como conclusión en base al objetivo general de este trabajo, se ha realizado con éxito un estudio teórico práctico del desempeño del servicio de VoIP sobre una red LTE, para el cual se tuvieron los siguientes beneficios:

- Sencillez en la puesta en operación del modelo y evaluación del método de evaluación.
- Se obtiene una amplia capacidad de estudio del desempeño de VoIP en redes LTE debido a la captura de información de la red LTE y la red IP.
- Se propuso un método de medición totalmente abierto, el mismo puede ser modificado de acuerdo a los requerimientos de qué servicio necesita ser probado. Para esta investigación se realizaron las pruebas con una llamada de voz de duración infinita, debido a que se buscaba verificar continuidad en la llamada y calidad de la misma. Un ejemplo de otro tipo de pruebas sería verificar la calidad de video en una llamada VoIP para zonas de baja cobertura y establecer condiciones mínimas de red LTE para mantener una video llamada de VoIP una QoE adecuada.

A continuación se lista las limitantes del estudio realizado:

- El software necesario para la captura de información de red LTE es licenciado, y las licencias son muy costosas debido a que estos programas están orientados a empresas medianas y grandes.
- Este estudio presenta complejidad para medir QoE usando métodos tradicionales existentes como MOS debido a que se necesitaría muchas mediciones de llamadas y la opinión de los participantes de las mismas, lo cual incrementaría el tiempo de análisis y los costos de implementación del método.

Al evaluar y comparar los métodos propuestos para la medición de calidad de servicio VoIP sobre LTE, en base a lo expuesto la *sección 4.1.1*, seleccionamos al tercer método. Éste usa la programación de aplicaciones en el servidor Asterisk de VoIP, sin embargo se detecta el siguiente comportamiento durante los eventos de

llamadas caídas o pérdida de la continuidad de la comunicación (se hace referencia al análisis realizado a una sesión de VoIP que se mantiene en estado *IN CALL*, Figuras 4.31 y 4.32, *sección 4.2.1*).

El teléfono móvil LTE al perder la conexión, sea por baja cobertura RSRP o por cualquier otro motivo, nunca se envía al servidor de VoIP el mensaje SIP BYE, el ejemplo se ve en la Figura 4.32, por lo tanto la llamada queda activa y no se liberan los recursos en el servidor de VoIP. En caso de haber iniciado una aplicación de Asterisk en el servidor VoIP, ésta sigue ejecutándose, como en el ejemplo del conteo. Al final este problema genera errores directamente en la programación del servidor de VoIP. Al iniciar una nueva llamada ocurrieron tres clases de eventos: El primero fue que se generó una nueva sesión de VoIP marcando a la extensión de la aplicación de conteo, ésta se inicia desde el comienzo. El segundo fue que se retomó la sesión perdida, con el conteo ya avanzado. Y el tercero fue una llamada con errores y mezcla de 2 sesiones de VoIP simultáneas.

Con respecto a las pruebas realizadas para evaluar la QoS vs. la cobertura LTE (RSRP), se pudo comprobar que inclusive con niveles de muy baja cobertura, todavía se puede establecer conexión aún cuando existe Jitter, la QoE es aceptable para mantener una conversación. Sin embargo, el principal factor que influye en la QoE son las pérdidas de paquetes y pérdida de sincronismo, y marca de tiempo errónea.

Durante todo el tiempo de pruebas se recibió y capturó información de la red LTE, sin embargo esto no quiere decir que exista una sesión de datos activa.

Al comparar las 2 zonas seleccionadas para evaluar QoS vs. cobertura LTE, la zona 2 es 15.87 dB menor a la Zona 3 en términos de RSRP, este valor se obtiene al restar el mínimo RSRP obtenido en cada zona, es decir el mínimo RSRP para Zona 2 fue de -136.12 y el mínimo para la zona 3 de -120.25. Sin embargo, teniendo la zona 2 con niveles de cobertura muy inferiores a los de la zona 3, la calidad de experiencia de servicio percibida por la persona que ejecutó las pruebas fue mejor. Aún teniendo muy malos niveles de cobertura, se podía establecer una sesión de datos LTE y por consiguiente la llamada de VoIP, esta última con una QoS

aceptable pero con la aparición de cortes momentáneos en la comunicación (silencios). En cambio para la zona 3 el evaluador percibió una peor QoE, aun cuando la cobertura era mejor, no se podía establecer conexión al servidor de VoIP con facilidad y si se lograba, esta era inestable. La mayor parte del tiempo se presentaba intermitencia en la conversación, es decir, instantes de tiempo en que la conversación quedaba en silencio. La zona 3 se caracteriza por tener peores niveles de RSRQ, esto debido a que es una zona alta donde la interferencia es mayor, debido a que no existe una celda servidora LTE definida, el dispositivo móvil recibe señal LTE de nodos lejanos que interfieren a los que estén más cerca.

No se puede definir el punto exacto de RSRP para el cual comience la aparición de valores muy altos de Jitter, para eso el estándar LTE asegura el servicio para niveles de -118 dBm, sin embargo para valores más bajos de cobertura todavía existe posibilidad de acceder al servicio pero se encuentra en el rango donde existe una alta probabilidad de encontrar degradación de QoS.

Los futuros desarrollos de VoLTE basan su señalización en SIP, por lo tanto el estudio realizado en este trabajo puede servir de base para futuros estudios de VoLTE una vez que se masifique su implementación. Por ejemplo, se pueden realizar estudios de la señalización de llamada de VoLTE para casos en los que sea necesario análisis y solución de problemas.

Con respecto a la relación empírica entre RSRP y los parámetros de QoS de VoIP, de todas las pruebas realizadas en los métodos evaluados se puede concluir de manera empírica que para promedios de RSRP menores a -95 dBm empiezan a aparecer pérdidas de paquetes Jitter, y demás problemas de QoS en VoIP. Por este motivo las empresas de telecomunicaciones tratan de establecer su cobertura a partir de valores de RSRP de -95 dBm aproximadamente. Adicionalmente, por este motivo empresas como OpenSignal establecen su buena cobertura a partir de -96 dBm, lo cual puede ser verificado en su página Web. En general los objetivos de cobertura los definen las empresas de telecomunicaciones en base a sus objetivos de mercado, a sus usuarios, sus expectativas de nuevos usuarios. Un objetivo de cobertura más restrictivo, es decir con valores promedios de RSRP mayores a -95

dBm, aunque aseguraría la QoS de LTE y de todos sus servicios relacionados, implicaría la instalación de un mayor número de estaciones bases, lo cual incrementa el costo de la red.

En el capítulo 4.3.3 se realiza un análisis de la cobertura LTE en función de los parámetros de VoIP con el objetivo de encontrar una relación empírica. Con certeza se puede concluir que el punto de inflexión de cobertura es de -95 dBm y que para valores menores aparecen problemas de QoS de VoIP como pérdida de paquetes. En conclusión, no se realizó un modelo matemático empírico, sino más bien se formuló una correlación empírica entre estos dos parámetros.

Se concluye que para futuras implementaciones de VoLTE, los proveedores de servicio deberían asegurar su cobertura para valores mayores a -95dBm para mantener la máxima QoS en el servicio IP.

Wireshark tiene la capacidad de reproducir las conversaciones de VoIP, en base a los archivos de captura, esta información es de mucha utilidad para evaluar el desempeño de la QoE. Para evaluar este desempeño se debe evaluar las trazas de reversa, lo cual nos brinda mayor información desde el dispositivo móvil en LTE hacia la red VoIP.

Se recomienda que para futuros trabajos de investigación en este tema, definir nuevos métodos para comparar otros protocolos de VoIP, como por ejemplo los que son utilizados por aplicaciones de VoIP famosas: WhatsApp, Facebook, Skype. Un método que podría ser útil para el análisis sería captura de trazas usando Wireshark del lado del Cliente de VoIP en LTE, en este caso se captura trazas del teléfono móvil y no del servidor. Esta información sería de utilidad para las operadoras de telefonía móvil, porque obtendrían información y modelos de comportamiento en función de cobertura y calidad de señal de red LTE de estas aplicaciones que son las de mayor uso comercial.

Se recomienda el uso de otro servidor de VoIP para tratar de replicar el evento de culminar una llamada sin el mensaje SIP BYE. En caso de VoLTE este evento es

muy importante ya que se debe definir un método de desconexión de VoIP basado en el protocolo RRC de LTE, de tal manera que el recurso de red LTE sea liberado.

Un análisis de flujo de llamada GSM o UMTS es muy similar al realizado en este trabajo. Para realizar la resolución de problemas en llamadas caídas comúnmente se estudia la señalización para detectar que pasa antes de un problema y así brindar una solución. Las recomendaciones para la operadora de servicio de telefonía móvil con respecto a optimización de llamadas caídas por baja cobertura pueden ser las siguientes:

- Desarrollo de sitios nuevos para mejorar cobertura.
- Optimización de parámetros de antena para mejorar cobertura donde sea posible.
- Fijar cobertura límite para prohibir servicio en mala cobertura.
- Optimizar umbrales de HO inter RAT de LTE a UMTS de acuerdo a niveles de cobertura LTE.

Para futuras implementaciones de VoLTE en interacción con CSFB, se recomienda el estudio de los parámetros óptimos para un correcto funcionamiento o coexistencia. La red móvil debería decidir si hacer una llamada VoLTE o aplicar CSFB de acuerdo a umbrales, que previamente debieron ser probados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] UIT. (2011, Junio) EL FUTURO DE LA VOZ – SITUACIÓN DE LA VoIP. [Online]. <http://www.itu.int/itu-news/manager/display.asp?lang=es&year=2007&issue=02&ipage=futureVoice2>
- [2] NOKIA, "Voice Over LTE Optimization White Paper," Finland, 2014.
- [3] J Joskowicz and R Sostelo. (2007) Universidad De Montevideo. [Online]. <http://www.um.edu.uy/>
- [4] Omair S. Malik, "Quality of Service Analysis for Audio over Cellular Voice Networks and Cellular Wireless Wide Area Networks," Massachusetts, 2007.
- [5] 3GPP, "3GPP TS 23.272 V10.7.0," 3rd Generation Partnership Project, Valbonne France, Technical Specification 2015.
- [6] GSMA, "LTE: Technology and Health. 4G and Mobile Wide Band," London, 2014.
- [7] Jia Shen Lingyang Song, *Evolved Cellular Network Planning and Optimization for UMTS and LTE.*, August 24, 2010.
- [8] Danny Satán, Luis Domínguez, and Washington Medina, *Estudio de Voz Sobre IP (VoIP) en Redes UMTS (Tesis de Ingeniería)*. Guayaquil, Guayas, Ecuador: FIEC ESPOL, 2010.
- [9] Marisela Dzul Escamilla. (2013, Dec.) Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. [Online]. http://www.uaeh.edu.mx/docencia/VI_Presentaciones/licenciatura_en_mercadotecnia/fundamentos_de_metodologia_investigacion/PRES39.pdf
- [10] Prasanna Gururaj and Raghavendrarao, *Voice over LTE.*: Delft University of Technology, 2012.
- [11] Mutale Chewie, *VoLTE by IP Multimedia Subsystem, Programmatic Implementing of Voice Service on LTE*. Helsinki: Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, 2015.
- [12] Roberto Yturralde. (2013, June) Entorno Urbano de Guayaquil. [Online]. <http://www.desdemitrinchera.com/2013/06/28/entorno-urbano/>
- [13] snstelecom. (2016) LTE Encyclopedia. [Online].

<https://sites.google.com/site/lteencyclopedia/home>

- [14] 3GPP TR 25.913, "Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN) (3GPP TR 25.913 version 8.0.0 Release 8)," 2009.
- [15] Telecomhall. (2015, May) telecomhall - What is CSFB and SRVCC in LTE? [Online]. <http://www.telecomhall.com/what-is-csfb-and-srvcc-in-lte.aspx>
- [16] 3GPP, "UTRA-UTRAN Long Term Evolution (LTE) and 3GPP System Architecture Evolution (SAE)," Canadá, 2010.
- [17] Morten Tolstrump, *Indoor Radio Planning, A practical Guide for GSM, DSC, UMTS, HSPA and LTE*. Denmark: WILEY, 2011.
- [18] 3GPP TR 21.905, "Vocabulary for 3GPP Specifications," 2005.
- [19] 3GPP TR 25.912, "Feasibility study for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)," 2009.
- [20] 3GPP TS 23.002, "Network architecture," 2011.
- [21] Leonhard Korowajczuk, *LTE, WIMAX AND WLAN NETWORK DESIGN, OPTIMIZATION AND PERFORMANCE ANALYSIS*. Reston VA, USA: WILEY, 2011.
- [22] ETSI TS 136 101 V12.7.0, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 12.7.0 Release 12)," FRANCE, 2015.
- [23] ELUNIVERSO. (2015, Feb) <http://www.eluniverso.com>. [Online]. <http://www.eluniverso.com/noticias/2015/02/26/nota/4592656/mas-espacios-bandas-4g>
- [24] CONATEL Resolución TEL-804-29, "Resolución TEL-804-29," Babahoyo, 2012.
- [25] Agilent 3GPP Long Term Evolution, "System Overview, Product Development and Test Challenges," 2009.
- [26] Ralf Krenher and Karsten Gaenger, *LTE SIGNALING, TROUBLESHOOTING, AND OPTIMIZATION*.: WILEY, 2011.
- [27] Harri Holma and Antti Toskala, *LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*. Finland: Wiley, 2009.

- [28] Voipforo. SIP Communication Example. [Online].
http://www.en.voipforo.com/SIP/SIP_example.php
- [29] James F. Durkin, *Voice-Enabling the Data Network: H.323, MGCP, SIP, QoS, SLAs, and Security*. Indianapolis: Cisco Press, 2010.
- [30] James Peters and Jonathan Davidson, *Voice over IP Fundamentals*. Indianapolis: Cisco Press, 2006.
- [31] Laura Chappel, *Wireshark Network Analysis Second Edition*. San Jose CA: Podbooks.com, Llc., 2012.
- [32] Álvaro Suárez. (2013, December) Integración de redes de voz en Internet.
- [33] Accuver. (2017, Jan) XCAL. [Online].
<http://www.accuver.com/home/sub.php?localNum=1&pageNum=2&subNum=1&subNum2=0>
- [34] CentOS. (2017, January) Download CentOS. [Online].
<https://www.centos.org/download/>
- [35] Matei Cezar. (2015, January) <http://www.tecmint.com>. [Online].
<http://www.tecmint.com/centos-7-installation/>
- [36] Linode, LCC. (2015, September) <https://www.linode.com/>. [Online].
<https://www.linode.com/docs/applications/voip/install-asterisk-on-centos-7>
- [37] LogMeIn Hamachi. (2016) Hamachi for Linux. [Online].
https://secure.logmein.com/welcome/documentation/EN/pdf/Hamachi/LogMeIn_Hamachi_UserGuide.pdf
- [38] OpenSignal. (2016) OpenSignal. [Online]. <https://opensignal.com/>
- [39] MAPINFO - Pitney Bowes. (2017, January) MapInfo Pro - Desktop GIS. [Online].
www.mapinfo.com/
- [40] OpenStreetMap Foundation. (2017, January) OpenStreetMap. [Online].
<https://www.openstreetmap.org/about>
- [41] wireshark. (2014, Jan) <https://ask.wireshark.org/>. [Online].
<https://ask.wireshark.org/questions/29008/what-are-difference-and-delta-in-wireshark-rtp-analysis>
- [42] NOKIA, "LTE-ADVANCE carrier Aggregation Optimization," Finlandia, 2015.

- [43] ITU-T Study Group 12 , "Definition of Quality of Experience (QoE)," Bled, Slovenia , 2007.
- [44] ASCOM. (2017, Jan) TEMS Investigation. [Online].
<http://www.tems.com/products-for-radio-and-core-networks/radio-network-engineering/ran-optimization-troubleshooting>

ANEXOS

A. ABREVIATURAS

3GPP	Third Generation Partnership Project
3GPP2	Third Generation Partnership Project version 2
ACK	Acknowledgement
aGW	Access Gateway
ARQ	Automatic Repeat Request
BER	Bit Error Rate
BLER	Block Error Rate
CAPEX	Capital Expenditures
CCO	Cell Change Order
CDMA	Code Division Multiple Access
CP	Cyclic Prefix
C-RNTI	Cell Radio Network Temporary Identifier
CSFB	Circuit Switch Fall Back
DFTS-OFDM	Discrete Fourier Transform Spread Orthogonal Frequency Division Multiplexing
DOWNLINK	Enlace de Bajada – Enlace Descendente
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EFR	Enhanced Full Rate
EGPRS	Enhanced GPRS

eNB	E-TRAN NodeB
EPC	Evolved Packet Core
E-UTRAN	Evolved UNTRAN
FDD	Frequency Division Duplex
FDM	Frequency Division Multiplexing
FR	Full Rate
GERAN	GSM EDGE Radio Access Network
GSM	Global System for Mobile Communication
GUTI	Globally Unique Temporary UE Identity
HARQ	Hybrid ARQ
H-FDD	Half Duplex Frecuency Division Duplexing
HO	Handover
HRPD	High Rate Packet Data para redes CDMA
IETF	Internet Engineering Task Force
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IP	Internet Protocol
LCID	Logical Cell ID
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service

MCS	Modulation and Coding Scheme
MGCP	Media Gateway Control Protocol
MME	Mobility Management Entity
MOS	Mean Opinion Score
MSC	Mobile Switching Center
MTCH	MBMS Traffic Channel
NACK	Non-Acknowledgement
NAS	Non-Access Stratum
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PCI	Physical Cell ID
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDD	Post Dial Delay
PDU	Packet Data Unit
PHY	Physical layer
PLMN	Public Land Mobile Network
POP	Point of Presence
PRB	Physical Resource Block
PSS	Primark Synchronization Signal
RA-RNTI	Random Access Radio Network Temporary Identity

RAT	Radio Access Technology
ROI	Return On Investment
RRC	Radio Resource Control
RRM	Radio Resource Management
RSRP	Received Signal Code Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
RU	Resource Unit
S1	Interfaz entre eNB y aGW
S1AP	S1 Application Part
S1-C	S1-Control plane
S1-U	S1-User plane
SAE	System Architecture Evolution
SAP	Service Access Point
SC-FDMA	Single Carrier – Frequency Division Multiple Access
SDMA	Spatial Division Multiple Access
SDP	Session Description Protocol
SDU	Service Data Unit
SGCP	Simple Gateway Control Protocol
SID	Silence Indicator Description
SIP	Session Initiation Protocol
SLA	Service Level Agreement

SRB	Signaling Radio Bearer
SSS	Secondary Synchronization Signal
UA	User Agent
UAC	User Agent Client
UAS	User Agent Server
UM	Unacknowledged Mode
URI	Uniform Resource Identifier

B. CÓDIGOS COMUNES DE RESPUESTA SIP

100: Trying
180: Ringing
181: Call is Being Forwarded
182: Queued
183: Session Progress
199: Early Dialog Terminated
200: OK
202: Accepted (used for referrals)
204: No Notification
300: Multiple Choices
301: Moved Permanently
302: Moved Temporarily
305: Use Proxy
380: Alternative Service
400: Bad Request
401: Unauthorized: Used only by registrars. Proxies should use proxy authorization
407
402: Payment Required (Reserved for future use)
403: Forbidden
404: Not Found: User not found
405: Method Not Allowed
406: Not Acceptable
407: Proxy Authentication Required
408: Request Timeout: Couldn't find the user in time
410: Gone: The user existed once, but is not available here anymore.
412: Conditional Request Failed [RFC3903]
413: Request Entity Too Large
414: Request-URI Too Long
415: Unsupported Media Type
416: Unsupported URI Scheme
417: Unknown Resource –Priority [RFC4412]
420: Bad Extension: Bad SIP Protocol Extension used, not understood by the server
421: Extension Required
422: Session Interval Too Small
423: Interval Too Brief
428: Use Identity Header [RFC4474]
429: Provide Referrer Identity [RFC3892]
430: Flow Failed [RFC5626]
433: Anonymity Disallowed [RFC5079]
436: Bad Identity Info [RFC4474]
437: Unsupported Certificate [RFC4474]
438: Invalid Identity Header [RFC4474]
439: First Hop Lacks Outbound Support [RFC5626]
440: Max-Breadth Exceeded [RFC5393]

469: Bad Info Package [RFC6086]
470: Consent Needed [RFC5360]
480: Temporarily Unavailable
481: Call/Transaction Does Not Exist
482: Loop Detected
483: Too Many Hops
484: Address Incomplete
485: Ambiguous
486: Busy Here
487: Request Terminated
488: Not Acceptable Here
489: Bad Event [RFC3265]
491: Request Pending
493: Undecipherable: Could not decrypt S/MIME body part
494: Security Agreement Required [RFC3329]
500: Server Internal Error
501: Not Implemented: The SIP request method is not implemented here
502: Bad Gateway
503: Service Unavailable
504: Server Timeout
505: Version Not Supported: The server does not support this version of the SIP protocol
513: Message Too Large
580: Precondition Failure [RFC3312]
600: Busy Everywhere
603: Decline
604: Does Not Exist Anywhere
606: Not Acceptable

C. FOTOS DE DESARROLLO DEL PROYECTO

En las Figuras C.1 y C.2 se muestran fotos de los dispositivos usados (en el coche en el que se realizaron pruebas).

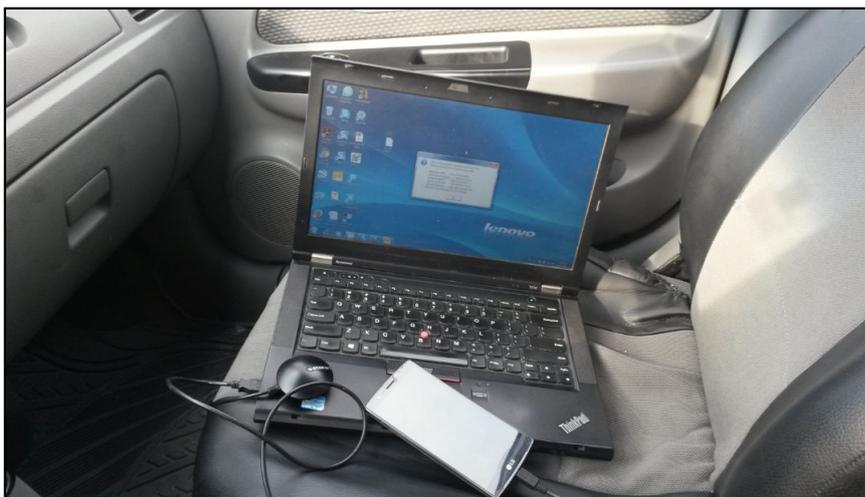


Figura C.1. Dispositivos utilizados para la captura de Datos en LTE

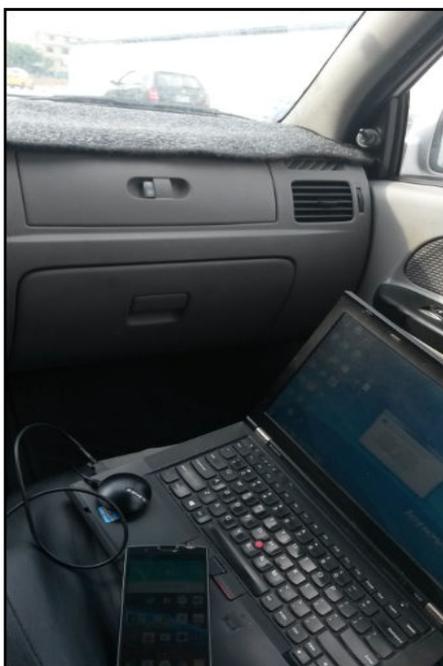


Figura C.2. Dispositivos utilizados para la captura de datos en LTE

D. EJEMPLOS DE PAQUETES CAPTURADOS

En las Figuras D.1 a D.5 se muestran los formatos de los paquetes capturados con la herramienta Wireshark para que se observe la complejidad que conlleva el análisis con dicha herramienta y posterior procesado para obtener información relevante.

```

▶ Frame 126: 765 bytes on wire (6120 bits), 765 bytes captured (6120 bits) on interface 0
▶ Ethernet II, Src: 7a:79:19:08:84:a2 (7a:79:19:08:84:a2), Dst: 7a:79:19:5d:06:22 (7a:79:19:5d:06:22)
▶ Internet Protocol Version 4, Src: 25.8.132.162, Dst: 25.93.6.34
▶ User Datagram Protocol, Src Port: 64149, Dst Port: 5060
  Source Port: 64149
  Destination Port: 5060
  Length: 731
  Checksum: 0xe10e [unverified]
  [Checksum Status: Unverified]
  [Stream index: 2]
▶ Session Initiation Protocol (INVITE)
  ▶ Request-Line: INVITE sip:1113@25.93.6.34;transport=UDP SIP/2.0
    Method: INVITE
  ▶ Request-URI: sip:1113@25.93.6.34;transport=UDP
    Request-URI User Part: 1113
    Request-URI Host Part: 25.93.6.34
    [Resent Packet: False]
  ▶ Message Header
    ▶ Via: SIP/2.0/UDP 25.8.132.162:64149;branch=z9hG4bK-524287-1---bd6d163340b7e41b;rport
      Transport: UDP
      Sent-by Address: 25.8.132.162
      Sent-by port: 64149
      Branch: z9hG4bK-524287-1---bd6d163340b7e41b
      RPort: rport
      Max-Forwards: 70
    ▶ Contact: <sip:WILLILTE@25.8.132.162:64149;transport=UDP>
      ▶ Contact URI: sip:WILLILTE@25.8.132.162:64149;transport=UDP
        Contact URI User Part: WILLILTE
        Contact URI Host Part: 25.8.132.162
        Contact URI Host Port: 64149
        Contact URI parameter: transport=UDP
  
```

Figura D.1. Paquete SDP 1/3

```

# To: <sip:1113@25.93.6.34;transport=UDP>
# SIP to address: sip:1113@25.93.6.34;transport=UDP
  SIP to address User Part: 1113
  SIP to address Host Part: 25.93.6.34
  SIP To URI parameter: transport=UDP
# From: <sip:WILLILTE@25.93.6.34;transport=UDP>;tag=8ea89b1d
# SIP from address: sip:WILLILTE@25.93.6.34;transport=UDP
  SIP from address User Part: WILLILTE
  SIP from address Host Part: 25.93.6.34
  SIP From URI parameter: transport=UDP
  SIP from tag: 8ea89b1d
Call-ID: wcQOMuKcVR4vUXChJiyXGg..
# CSeq: 1 INVITE
  Sequence Number: 1
  Method: INVITE
Content-Type: application/sdp
User-Agent: Zoiper rv2.8.9
Allow-Events: presence, kpml, talk
Content-Length: 241
# Message Body
# Session Description Protocol
  Session Description Protocol Version (v): 0
# Owner/Creator, Session Id (o): Zoiper 0 0 IN IP4 25.8.132.162
  Owner Username: Zoiper
  Session ID: 0
  Session Version: 0
  Owner Network Type: IN
  Owner Address Type: IP4
  Owner Address: 25.8.132.162
  Session Name (s): Zoiper
# Connection Information (c): IN IP4 25.8.132.162
  Connection Network Type: IN
  Connection Address Type: IP4
  Connection Address: 25.8.132.162
# Time Description, active time (t): 0 0

```

Figura D.2. Paquete SDP 2/3

```

  Session Start Time: 0
  Session Stop Time: 0
# Media Description, name and address (m): audio 51712 RTP/AVP 3 0 8 101
  Media Type: audio
  Media Port: 51712
  Media Protocol: RTP/AVP
  Media Format: GSM 06.10
  Media Format: ITU-T G.711 PCMU
  Media Format: ITU-T G.711 PCMA
  Media Format: DynamicRTP-Type-101
# Media Attribute (a): rtpmap:3 GSM/8000
  Media Attribute Fieldname: rtpmap
  Media Format: 3
  MIME Type: GSM
  Sample Rate: 8000
# Media Attribute (a): rtpmap:0 PCMU/8000
  Media Attribute Fieldname: rtpmap
  Media Format: 0
  MIME Type: PCMU
  Sample Rate: 8000
# Media Attribute (a): rtpmap:8 PCMA/8000
  Media Attribute Fieldname: rtpmap
  Media Format: 8
  MIME Type: PCMA
  Sample Rate: 8000
# Media Attribute (a): rtpmap:101 telephone-event/8000
  Media Attribute Fieldname: rtpmap
  Media Format: 101
  MIME Type: telephone-event
  Sample Rate: 8000
# Media Attribute (a): fmp:101 0-16
  Media Attribute Fieldname: fmp
  Media Format: 101 [telephone-event]
  Media format specific parameters: 0-16
  Media Attribute (a): sendrecv

```

Figura D.3. Paquete SDP 3/3

```

▷ Frame 93653: 214 bytes on wire (1712 bits), 214 bytes captured (1712 bits) on interface 0
▷ Ethernet II, Src: 7a:79:19:08:84:a2 (7a:79:19:08:84:a2), Dst: 7a:79:19:5d:06:22 (7a:79:19:5d:06:22)
▷ Internet Protocol Version 4, Src: 25.8.132.162, Dst: 25.93.6.34
# User Datagram Protocol, Src Port: 51712, Dst Port: 10142
  Source Port: 51712
  Destination Port: 10142
  Length: 180
  Checksum: 0x3c41 [unverified]
  [Checksum Status: Unverified]
  [Stream index: 266]
# Real-Time Transport Protocol
  ▷ [Stream setup by SDP (frame 42559)]
  10.. .... = Version: RFC 1889 Version (2)
  ..0. .... = Padding: False
  ...0 .... = Extension: False
  .... 0000 = Contributing source identifiers count: 0
  0... .... = Marker: False
  Payload type: ITU-T G.711 PCM (0)
  Sequence number: 642
  [Extended sequence number: 66178]
  Timestamp: 15272359
  Synchronization Source identifier: 0x62d39608 (1658033672)
  Payload: 5f676d737b71686a7ef0eae8edf2f9f1e8e5e6eef3f3f7f8...

```

Figura D.4. Paquete RTP

```

▷ Frame 265: 214 bytes on wire (1712 bits), 214 bytes captured (1712 bits) on interface 0
▷ Ethernet II, Src: 7a:79:19:5d:06:22 (7a:79:19:5d:06:22), Dst: 7a:79:19:08:84:a2 (7a:79:19:08:84:a2)
# Internet Protocol Version 4, Src: 25.93.6.34, Dst: 25.8.132.162
  0100 .... = Version: 4
  ... 0101 = Header Length: 20 bytes (5)
  ▷ Differentiated Services Field: 0x00 (DSCP: CS0, ECN: Not-ECT)
  Total Length: 200
  Identification: 0x9409 (37897)
  ▷ Flags: 0x02 (Don't Fragment)
  Fragment offset: 0
  Time to live: 64
  Protocol: UDP (17)
  Header checksum: 0xe8f2 [validation disabled]
  [Header checksum status: Unverified]
  Source: 25.93.6.34
  Destination: 25.8.132.162
  [Source GeoIP: Unknown]
  [Destination GeoIP: Unknown]
# User Datagram Protocol, Src Port: 10530, Dst Port: 51712
  Source Port: 10530
  Destination Port: 51712
  Length: 180
  Checksum: 0xe28f [unverified]
  [Checksum Status: Unverified]
  [Stream index: 0]
# Data (172 bytes)
  Data: 8000383c0076f1503200d0e433f3a3a3e403d343734384a...
  [Length: 172]

```

Figura D.5. Paquete UDP