ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ESTUDIO PARA LA RECOMENDACIÓN DE PARÁMETROS TÉCNICOS A UTILIZARSE EN EL CONTROL DE REDES LTE 4G EN ECUADOR

PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

FAUSTO ENRIQUE LEMA VILLENA
fausto141191@hotmail.com

DIRECTOR: Ing. CHRISTIAN JOSÉ TIPANTUÑA TENELEMA, M.Sc.
christian.tipantuna@epn.edu.ec

CODIRECTOR: Ing. PABLO ANIBAL LUPERA MORILLO
pablo.lupera@epn.edu.ec

Quito, mayo 2017

DECLARACIÓN

Yo, Fausto Enrique Lema Villena, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Fausto Enrique Lema Villena

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Fausto Enrique Lema Villena, bajo nuestra supervisión.

Ing. Christian Tipantuña, M.Sc.

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Pablo Anibal Lupera

CO-DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia, por todo el esfuerzo, apoyo y sacrificio brindado durante mi formación académica, en especial a mi madre que siempre me brindó su apoyo en todas mis actividades académicas.

Agradezco el apoyo brindado por la Agencia de Regulación y Control de las telecomunicaciones (ARCOTEL), por su ayuda al facilitar equipos de medición y conocimientos en el uso de los mismos, con los que se realizó el presente estudio, en especial al Ing. Diego Naranjo por su ayuda y guía en el desarrollo de pruebas en campo y su posterior análisis.

A mi director Ing. Christian Tipantuña y co-director Ing. Pablo Lupera, por su tiempo, guía y dedicación brindada durante la realización de esta meta profesional.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi familia y logro profesional a mi familia, quienes siempre me brindaron su ayuda y apoyo durante cada etapa de mi vida académica.

CONTENIDO

1 CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS TEÓRICOS 1
1.1 INTRODUCCION [1] 1
1.2 EVOLUCIÓN DE ESTÁNDARES DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS [1] 2
1.2.1 PRIMERA GENERACIÓN 1G [23] 3
1.2.2 SEGUNDA GENERACION 2G [23] 3
1.2.3 TERCERA GENERACIÓN 3G [23] 4
1.2.4 CUARTA GENERACIÓN 4G [23] 5
1.3 LONG TERM EVOLUTION (LTE) 5
1.3.1 EVOLUCIÓN DEL ESTÁNDAR LTE [4][5] 6
1.3.1.1 Release 8 [4] 7
1.3.1.2 Release 9 [4] 7
1.3.1.3 Release 10 [4] 8
1.3.1.4 Release 11 [4] 8
1.3.1.5 Release 12 [4] 9
1.3.1.6 Release 13 [5] 9
1.4 ARQUITECTURA DE LA TECNOLOGIA LTE 4G [1] 10
1.4.1 RED DE ACCESO TERRESTRE EVOLUCIONADA UNIVERSAL (E-UTRAN) 11
1.4.1.1 Evolved NodeB (eNB) 11
1.4.1.2 Nodos de retransmisión [9] 13
1.4.1 RED TRONCAL DE PAQUETES EVOLUCIONADA (EPC) [10] [11]14
1.4.1.1 MME (Mobility Management Entity) [10] 16
1.4.1.2 S-GW (Serving Gateway) 17
1.4.1.3 P-GW (PDN Gateway) 18
1.4.1.4 HSS (Home Subscriber Server) 18
1.4.2 IMS (IP MULTIMEDIA SUBSYSTEM) [10] 19
1.4.3 EQUIPOS DE USUARIO [10] 19
1.4.3.1 Categorías de equipos de usuario [10] 20
1.5 TECNOLOGÍAS USADAS A NIVEL FÍSICO [10] 21
1.5.1 OFDM 22
1.5.2 OFDMA 23
1.5.2.1 Procedimientos asociados a OFDMA 24

1.5.2.1.1 Programación de paquetes 24
1.5.2.1.2 Adecuación del enlace 25
1.5.3 SC-FDMA 27
1.5.4 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 28
1.6 REVISIÓN DE LA CAPA FÍSICA DE LTE-A [1] 29
1.6.1 INTERFACE AIRE [1] 29
1.6.2 FRECUENCIAS DE OPERACIÓN [1] 30
1.6.3 PRB - PHYSICAL RESOURCE BLOCK [10] 31
1.6.4 ENLACE DESCENDENTE 34
1.6.4.1 Señales físicas [7] 34
1.6.4.1.1 Señales de referencia (RS) 34
1.6.4.1.2 Señal de Sincronización (SCH) 35
1.6.4.2 Canales físicos [10] 36
1.6.4.2.1 Canales físicos de tráfico 36
1.6.4.2.2 Canales físicos de control 37
1.6.5 AGREGACIÓN DE PORTADORA [15] [16] 38
1.6.6 PROTOCOLOS [10] 40
1.6.6.1 Protocolos de la interfaz de radio [10] 40
1.6.7 PROCEDIMIENTOS ASOCIADOS A LA INTERFAZ AIRE [7] 42
1.6.7.1 Sincronización y adquisición inicial de parámetros 42
1.6.7.2 Mecanismos de acceso aleatorio 44
1.6.7.2.1 Acceso por contienda 45
1.6.7.2.2 Acceso regulado 46
1.6.7.3 Mecanismos de notificación (Paging) 47
1.6.7.4 Mecanismos de obtención del servicio portador de radio 47
1.6.7.5 Estado del canal (CQI-Reporting) 50
1.7 REVISIÓN DE TRABAJOS PREVIOS AFINES 51
1.7.1 TESIS “ESTUDIO TECNICO PARA LA RECOMENDACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DE SERVICIO SMA SOBRE REDES MOVILES UMTS EN EL ECUADOR” [41] 51
1.7.2 TESIS “ESTUDIO DE LA CALIDAD DE SERVICIO EN LAS REDES MÓVILES EN EL PERÚ” [42] 53
1.7.3 CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO DE PARÁMETROS TÉCNICOS DE QoS EN REDES 4G 54
1.8 CALIDAD DE SERVICIO (QOS) [18] [19] 54

1.8.1 Reserva de ancho de banda (Throughput) 55
1.8.2 Retardo (Delay) 55
1.8.3 Jitter 55
1.8.4 Pérdida de paquetes..... 55
1.8.5 NORMATIVAS TÉCNICAS RELACIONADAS CON CALIDAD DE SERVICIO. 56
1.8.6 CALIDAD DE SERVICIO EN REDES 2G Y 3G [15] [17]..... 57
1.8.6.1 Accesibilidad a la red..... 57
1.8.6.2 Accesibilidad de servicio 58
1.8.6.3 Integridad de servicio 58
1.8.7 PARÁMETROS DE CALIDAD EVALUADOS EN ECUADOR A OPERADORES DE SMA EN REDES 2G Y 3G 59
2 CAPÍTULO II: PARÁMETROS TÉCNICOS DE CALIDAD DE SERVICIO EN LTE-A 4G 61
2.1 INTRODUCCIÓN [1] 61
2.1.1 REQUERIMIENTOS DE QOS PARA LOS USUARIOS FINALES [24] 62
2.1.2 REQUERIMIENTOS TÉCNICOS DE QOS [24] 62
2.2 CALIDAD DE SERVICIO EN REDES LTE-A [25]..... 62
2.2.1 PORTADORES EPS [26] 63
2.2.2 PARÁMETROS DE QOS EN PORTADORES EPS [29] 67
2.2.2.1 Identificador de clase (QCI) [25] 67
2.2.2.2 Prioridad de asignación y retención (ARP - Allocation And Retention Priority) [25][26] 68
2.2.2.3 MBR (Maximum Bit Rate) [26] 69
2.2.2.4 APN-AMBR (Access Point Name - Aggregate Maximum Bit Rate) (UL / DL) [26]..... 69
2.2.2.5 UE-AMBR (UL / DL) [26] 70
2.2.2.6 TFT (Traffic Flow Template) [28] 70
2.2.2.7 L-EBI (Linked EPS Bearer ID) [28] 70
2.2.2.8 Dirección IP / PDN [28]..... 71
2.2.3 QOS EN EL SERVICIO DE VOZ EN LA RED LTE-A [43][44]..... 71
2.2.3.1 Verificación de la calidad de la llamada 73
2.2.4 APROVISIONAMIENTO Y APLICACIÓN DE QOS [28]..... 74
2.2.4.1 Aprovisionamiento de QOS [28] 74
2.2.4.2 Aplicación de QoS [28] 76

2.2.5 PARÁMETROS DE CALIDAD DE SERVICIO TÉCNICOS 76
2.2.5.1 Reference Signal Received Power (RSRP) [30] 77
2.2.5.2 Reference Signal Received Quality (RSRQ) [30] 77
2.2.5.3 Received Signal Strength Indicator (RSSI) [30] 78
2.2.5.4 Tasa de error por bloque (BLER - Block Error Rate) 78
2.2.6 RESUMEN DE PARÁMETROS A EVALUARSE 79
2.2.7 CONSIDERACIONES PREVIAS A ESTABLECER PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN [32] 80
2.2.7.1 Velocidad de datos 80
2.2.7.2 Ambiente de medición 80
2.2.7.3 Tipos de terminales disponibles en el mercado ecuatoriano 81
2.2.7.4 Movilidad durante las pruebas 82
2.2.7.5 Disponibilidad de cobertura 83
2.2.7.6 Banda de frecuencias y ancho de banda 83
2.2.8 DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPAMIENTO EMPLEADO EN LAS PRUEBAS 85
3 CAPÍTULO III: MEDICIÓN, RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS OBTENIDOS 89
3.1 CONSIDERACIONES PARA LA TOMA DE MEDICIONES 89
3.1.1 Escenario de medición 89
3.1.2 Procedimiento de medición y recolección de datos [12] 92
3.2 PROCEDIMIENTO EFECTUADO PARA LA TOMA DE MEDICIONES.96
3.3 PROCESAMIENTO DE DATOS [37][38] 99
3.4 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS 104
3.4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS 105
3.4.1.1 PRUEBAS DE CARGA Y DESCARGA DE ARCHIVOS DEL SERVIDOR FTP 106
3.4.1.2 Parámetro de cobertura RSRP 106
3.4.1.2.1 Análisis de resultados en el enlace de bajada 106
3.4.1.2.2 Análisis de resultados en el enlace de subida 108
3.4.1.3 Parámetro de cobertura RSRQ 109
3.4.1.3.1 Análisis de resultados en el enlace de bajada 110
3.4.1.3.2 Análisis de resultados en el enlace de subida 111
3.4.1.4 PRUEBAS DE PETICIONES A PÁGINAS WEB 113
3.4.1.4.1 Resultados obtenidos en pruebas realizadas a páginas web113

3.4.1.4.2 Resultados obtenidos en pruebas de latencia 115
3.4.1.4.3 Resultados obtenidos en pruebas de BLER 116
3.4.2 RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS 117
3.4.2.1 RECOMENDACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA ARCOTEL117
3.4.2.1.1 Aspectos generales 117
3.4.2.1.2 Consideraciones previas a las mediciones en campo.....118
3.4.2.1.3 Procedimiento efectuado durante las pruebas.....119
3.4.2.1.4 Presentación y análisis de resultados.....121
4 CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 128
4.1 CONCLUSIONES 128
4.2 RECOMENDACIONES 130
5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....132
6 ANEXOS 137

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Generaciones de tecnología celular [2] 3
Figura 1.2 Evolución del estándar LTE [3]..... 6
Figura 1.3 Arquitectura de LTE-Advanced [7] 11
Figura 1.4 Red de acceso E-UTRAN [8]..... 12
Figura 1.5 Nodo de retransmisión [9] 14
Figura 1.6 Arquitectura básica de la red EPC [8]..... 15
Figura 1.7 Arquitectura del equipo de usuario [10] 19
Figura 1.8 Cuatro subportadoras formando una portadora OFDM. [12] 22
Figura 1.9 Inserción de Prefijo cíclico. [13]..... 23
Figura 1.10 OFDMA multiplexación de usuarios [10]..... 23
Figura 1.11 Scheduling de paquetes en OFDMA [10] 25
Figura 1.12 Adaptación de enlace en OFDMA [10] 26
Figura 1.13 Transmisión de señal SC-FDMA [10] 27
Figura 1.14 Diversidad de antenas..... 29
Figura 1.15 Bloque de Recurso Físico (PRB) [10]..... 32
Figura 1.16 Ubicación de señales de referencia primarias y secundarias [10] 35
Figura 1.17 Agregación de portadora [16] 39
Figura 1.18 Alternativas de la agregación de portadora [16] 39
Figura 1.19 Protocolos Capa enlace [6] 40
Figura 1.20 Sincronización y adquisición inicial de parámetros [10] 43
Figura 1.21 Acceso por contienda [10]..... 45
Figura 1.22 Acceso regulado [10]..... 47
Figura 1.23 Secuencia de mensajes para establecimiento de conexión [10]... 49
Figura 2.1 Servicios portadores en la red LTE-A [26]..... 65
Figura 2.2 Servicio portador en la red LTE-A y calidad de servicio asociada [28]65
Figura 2.3 Entidades que cumplen el APN – AMBR [27]..... 70
Figura 2.4 Arquitectura y flujo de llamada sobre VoLTE [43]..... 73
Figura 2.5 Aprovisionamiento de QoS [28]..... 75
Figura 2.6 Aplicación de QoS [28]..... 76
Figura 2.7 Esquemas de bandas de frecuencias A5, B5, B3 y C1 [8]..... 84
Figura 2.8 Sierra Wireless AirPrime modelo MC7700 Propiedad de ARCOTEL86
Figura 2.9 TEMS Investigation [34] 88

Figura 2.10 Equipamiento instalado en vehículo propiedad de la ARCOTEL .. 88
Figura 3.1 Cobertura anunciada por el operador de SMA CNT EP [35] 90
Figura 3.2 Cobertura anunciada por el operador de SMA MOVISTAR [36] 90
Figura 3.3 Zonas de la ciudad de Quito obtenida de Google Maps 91
Figura 3.4 Polígono de medición sector Iñaquito..... 92
Figura 3.5 Puntos de medición estáticos dentro de polígono de medición. 94
Figura 3.6 Valores de cobertura en el polígono de medición 98
Figura 3.7 Ubicaciones de las mediciones efectuadas, obtenidos de la App Orux Maps 98
Figura 3.8 Software de procesamiento TEMS DISCOVERY V10.0.7[38] 99
Figura 3.9 Selección de archivos para la importación de información. 100
Figura 3.10 Información obtenida en las mediciones realizadas. 100
Figura 3.11 Presentacion en mapa en el sofware TEMS DISCOVERY [38] ...101
Figura 3.12 Presentacion en gráfica de tiempo en el sofware TEMS DISCOVERY [38].....102
Figura 3.13 Presentacion de mensajes en el sofware TEMS DISCOVERY [38]103
Figura 3.14 Presentación en tabla en el sofware TEMS DISCOVERY [38] 103
Figura 3.15 RSRP vs THROUGHPUT DL 107
Figura 3.16 RSRP vs THROUGHPUT DL valores inferiores a -100 dbm 107
Figura 3.17 RSRP vs THROUGHPUT UL 109
Figura 3.18 RSRP vs THROUGHPUT UL valores inferiores a -96 dbm 109
Figura 3.19 RSRQ vs THROUGHPUT DL.....110
Figura 3.20 RSRQ vs THROUGHPUT DL valores inferiores a -11 dbm.....111
Figura 3.21 RSRQ vs THROUGHPUT UL.....112
Figura 3.22 RSRQ vs THROUGHPUT UL valores inferiores a -11 dbm.....112
Figura 3.23 Top de páginas web en Ecuador [39] 113
Figura 3.24 Tiempo de carga vs parámetro de cobertura RSRP 114
Figura 3.25 Tiempo de carga vs parámetro de cobertura RSRQ.....115
Figura 3.26 Latencia hacia el servidor web de Google 116
Figura 3.27 BLER obtenido en las pruebas de datos 117
Figura 3.28 RSRP vs THROUGHPUT DL 122
Figura 3.29 RSRP vs THROUGHPUT UL 122
Figura 3.30 RSRQ vs THROUGHPUT DL.....123
Figura 3.31 RSRQ vs THROUGHPUT UL.....123
Figura 3.32 Tiempo de carga vs parametro de cobertura RSRP 124

Figura 3.33 Tiempo de carga vs parámetro de cobertura RSRQ.....125
Figura 3.34 Latencia hacia el servidor web de Google 126
Figura 3.35 BLER obtenido en las pruebas de datos. 127

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Requisitos mínimos para tecnologías 4G establecidos por la ITU-R [4] 6
Tabla 1.2 Especificaciones presentadas por el estándar LTE-Advanced [4] ... 10
Tabla 1.3 Parámetros de capa física del terminal móvil [33]..... 21
Tabla 1.4 PRBs disponibles por ancho de banda..... 31
Tabla 1.4 PRBs disponibles por ancho de banda..... 32
Tabla 1.5 Velocidades pico teóricas en función de la canalización [10]..... 33
Tabla 1.6 Valores objetivos prácticos obtenidos [41]..... 52
Tabla 1.7 Niveles mínimos de cobertura de acuerdo a la tecnología [21]..... 60
Tabla 2.1 Estandarización de las características de los valores QCI [25]..... 68
Tabla 2.2 Resumen de parámetros a ser evaluados 79
Tabla 2.3 Smartphone 4G/LTE-A disponibles en Ecuador 82
Tabla 2.4 Características de Sierra Wireless AirPrime modelo MC7700 87
Tabla 3.1 Muestra aleatoria tomada con instrumentos de medición. 96
Tabla 3.2 Informe tecnico de calidad obtenido. 105
Tabla 3.3 Valores de cobertura mínimos recomendados 121
Tabla 3.4 Valores de cobertura mínimos recomendados 124

RESUMEN

En el presente estudio se realiza una revisión de los parámetros técnicos que permite proporcionar calidad de servicio (QoS) a los usuarios de las redes celulares LTE-A.

Inicialmente se realiza un estudio de la tecnología LTE 4G, se revisa aspectos técnicos generales, características de funcionamiento y calidad de servicio. Adicionalmente se realiza la revisión de trabajos relacionados con la calidad de servicio en tecnologías previas 2G y 3G, considerando conceptos generales, estándares y metodología de medición.

Se establece y describe los parámetros técnicos de calidad en base a la información obtenida. Adicionalmente, se describirán las características de equipamiento disponible para las mediciones de los diferentes parámetros, estos equipos fueron facilitados por la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL).

Se describe el procedimiento establecido para las mediciones de parámetros técnicos de calidad. Se detalla la metodología a seguir para efectuar las mediciones, y se presentan las configuraciones de los equipos a utilizarse durante la prueba. La configuración de los equipos estará enfocada a la obtención de parámetros de cobertura y pruebas de transferencia de datos, solicitudes de carga a páginas web y pruebas de conectividad. Además, se realiza el procesamiento y análisis de resultados obtenidos.

Como resultado de la información obtenida y analizada se presenta una propuesta para la recomendación de parámetros de calidad del servicio móvil avanzado de LTE para la ARCOTEL

PRESENTACIÓN

En el presente proyecto se realiza el estudio y análisis de los parámetros técnicos orientados a brindar QoS (Quality of Service) a los usuarios de las redes LTE-A (Long Term Evolution - Advanced) presentes en el Ecuador, y presentar una recomendación de los mismos a la ARCOTEL. Para cumplir con los objetivos propuestos, el presente trabajo de titulación se ha dividido en los siguientes capítulos.

En el primer capítulo se realiza un estudio de la tecnología LTE 4G, se revisan aspectos técnicos generales, características de funcionamiento y calidad de servicio. Adicionalmente se realiza la revisión de trabajos relacionados con la calidad de servicio en tecnologías previas 2G y 3G, considerando conceptos generales, estándares y metodología de medición.

En el segundo capítulo se establecen y describen los parámetros técnicos de calidad en base a la información obtenida en el Capítulo I. Adicionalmente, se describen las características de equipamiento disponible para las mediciones de los diferentes parámetros.

En el tercer capítulo se describe el procedimiento establecido para las mediciones de parámetros técnicos de calidad. Se detalla la metodología a seguir para efectuar las mediciones, y se presentan las configuraciones de los equipos a utilizarse durante la prueba. La configuración de los equipos estará enfocada a la obtención de parámetros de cobertura y pruebas de transferencia de datos como se detalla en el alcance del presente proyecto de titulación. En este capítulo además se realiza el procesamiento y análisis de resultados obtenidos. Al final de este capítulo se presenta una propuesta para la recomendación de parámetros de calidad del servicio móvil avanzado de LTE.

En el cuarto y último capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones en base a la información recopilada y los resultados obtenidos.

CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En el presente capítulo se realiza un estudio de la tecnología LTE 4G, se revisan aspectos técnicos generales, características de funcionamiento y calidad de servicio. Adicionalmente se realiza la revisión de trabajos relacionados con la calidad de servicio en tecnologías previas 2G y 3G, considerando conceptos generales, estándares y metodología de medición.

1.1 INTRODUCCION [1]

Actualmente nos encontramos en la era de la revolución de datos móviles con un creciente mercado de *smartphones*, tabletas y ordenadores portátiles, los usuarios demandan servicios y aplicaciones del sistema de comunicaciones móviles que van mucho más allá de los servicios de voz y telefonía.

El crecimiento intensivo de los servicios móviles de datos y uso de aplicaciones, que permiten el acceso a servicios como navegación web, redes sociales, música y *streaming* de vídeo, entre otros; se han convertido en la fuerza motriz para el desarrollo de la próxima generación de estándares inalámbricos.

Como resultado, nuevos estándares se han desarrollado para proporcionar mayores velocidades en la transmisión de datos y la capacidad de red necesaria para proporcionar el acceso a los servicios anteriormente mencionados y garantizar el funcionamiento de aplicaciones multimedia.

Uno de los estándares desarrollados e implementados en las redes de telefonía celular es *LTE* (*Long Term Evolution*) y su posterior mejora LTE - A (*Long Term Evolution-Advanced).* Estos estándares se han desarrollado para responder a las exigencias de la época y hacer realidad el objetivo de lograr las comunicaciones móviles de banda ancha global.

Las metas y los objetivos de LTE incluyen; mayores velocidades de datos, mejora de la capacidad del sistema en general, mejora en la cobertura, operaciones de ancho de banda flexible, agregación de portadora[1], mejora de la

[1] Agregación de portadoras (CA) en LTE-Advanced permite la agregación de un máximo de cinco portadoras componentes de hasta 20 MHz de ancho de banda para alcanzar un ancho de banda de transmisión de hasta 100 MHz.

eficiencia espectral[2], baja latencia, reducción de costos de operación, soporte multi-antena, y una perfecta integración con sistemas de comunicaciones móviles existente y con Internet.

En cierto modo, LTE y LTE -*Advanced* son representantes de lo que se conoce como un sistema inalámbrico de cuarta generación, y pueden ser considerados como una evolución de los predecesores de tercera generación.

Para poner en contexto la evolución de la tecnología móvil que condujo a la introducción de los estándares LTE. A continuación, se presenta una breve reseña de las tecnologías celulares, con la intención de mostrar los orígenes de muchas tecnologías facilitadoras de los estándares LTE y aclarar algunos de sus requisitos.

1.2 EVOLUCIÓN DE ESTÁNDARES DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS [1]

En las últimas dos décadas se han incorporado diversos estándares móviles, los cuales dependiendo de los servicios que proporcionan y características técnicas se agrupan en tecnologías de segunda generación (2G) y de tercera generación (3G), las cuales se encuentran implementadas actualmente.

Los estándares 2G tiene por objetivo el soporte de aplicaciones de telefonía y voz móvil, en tanto que los estándares 3G marcan el inicio de la revolución de datos basada en paquetes y soporte a Internet.

En la Figura 1.1 se muestra la evolución de las tecnologías celulares asociados a los servicios que ofrecen y los estándares que permitieron y permiten suplir los servicios ofrecidos.
En las siguientes secciones 1.2.1, 1.2.2, 1.2.3 y 1.2.4, se presenta una pequeña descripción de cada generación de tecnología celular, exponiendo las características técnicas más importantes.

[2] Eficiencia espectral: Es la medida de cuan bien aprovechada es una banda de frecuencia para la transmisión de datos.

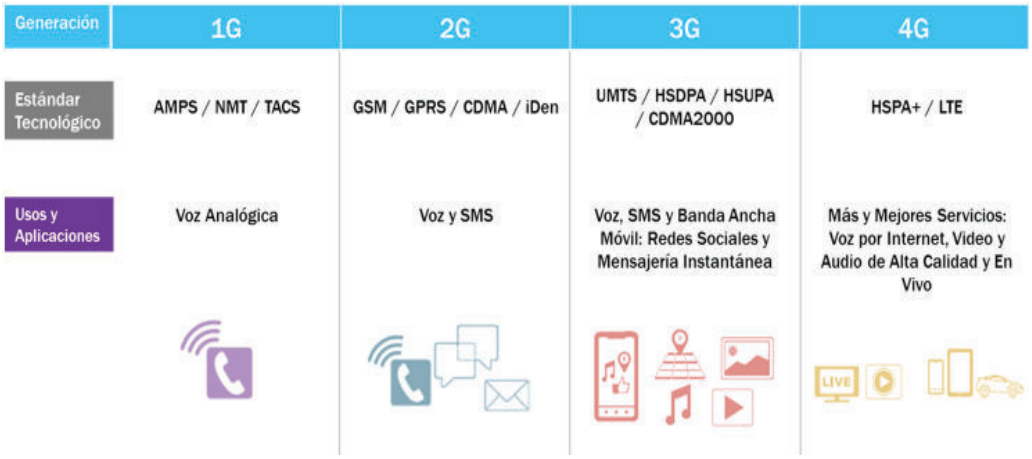

Figura 1.1 Generaciones de tecnología celular [2]

1.2.1 PRIMERA GENERACIÓN 1G [23]

En esta generación la tecnología usada es netamente analógica y presta servicio de comunicación por voz, los estándares que se usaron en esta tecnología principalmente son:

- NMT (*Nordic Mobile Telephone*, Telefonia Movil Nórdica). Implementado con los estándares NMT-450 y NMT-900 usando las bandas de frecuencia de 450 MHz y 900 MHz respectivamente.
- TACS (*Total Access Communications Systems*, Sistemas de Comunicaciones de Acceso Total). El mismo que operaba usando la banda de frecuencia de 900 MHz.
- AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*, Sistema de telefonía Móvil Avanzado). Sistema que operaba usando la banda de frecuencia de 800 MHz.

En esta generación los terminales móviles se caracterizaban por ser grandes y pesados.

1.2.2 SEGUNDA GENERACION 2G [23]

A partir de la presente generación, la telefonía celular se digitaliza, las principales tecnologías usadas en esta generación son:

- GSM (*Global System for Mobile*). Usa canales dedicados[3] para ofrecer velocidades de datos hasta 9.6 Kbps.
- GPRS (*General Packet Radio Service*). Permite velocidades de transmisión de datos de 115 Kbps.
- CDMA One (*Code Division Multiple Access One*). Emplea métodos de multiplexación CDMA[4] por la cual todas las estaciones transmiten en la misma banda de frecuencias.
- EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM*). Es una mejora de la tecnología GSM para la transmisión de datos, logrando velocidades de transmisión de hasta 384 Kbps.

Los sistemas de segunda generación (2G) a más de brindar servicio de comunicaciones por voz, implementan ciertas capacidades de transmisión de datos entre ellos un servicio popularmente conocido como SMS[5] (*Short Message Service*). En la actualidad los sistemas de segunda generación continúan brindando servicio a los usuarios.

1.2.3 TERCERA GENERACIÓN 3G [23]

Las tecnologías de tercera generación 3G, ofrecen a los usuarios servicios de telecomunicaciones que requieren mayores velocidades de transmisión de datos.

Los sistemas de tercera generación 3G, permiten alcanzar velocidades de hasta 384 Kbps a usuarios con movilidad limitada y 2Mbps para usuarios sin movilidad. Las principales tecnologías usadas en esta generación son:

- CDMA2000 (*Code Division Multiple Access 2000*). Una evolución de la tecnología CDMA One, la cual permite alcanzar velocidades teóricas de 2.4 Mbps.
- UMTS (*Universal Mobile Telecomunications System*). Tecnología que utiliza la tecnología WCDMA (Acceso múltiple por división de código de

[3] Canal dedicado: Es la asignación de recursos durante el envió de información a través de una red de datos.
[4] CDMA: Es un término genérico para varios métodos de multiplexación o control de acceso al medio basado en la tecnología de espectro expandido.
[5] SMS: Es un servicio disponible en los teléfonos móviles que permite el envío de mensajes cortos, conocidos como mensajes de texto, entre teléfonos móviles.

banda ancha), permitiendo mayor eficiencia espectral en comparación con CDMA.

- HSPA (*High-Speed Packet Access*). Se presenta como la unión de los estándares HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) y HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*), permitiendo velocidades de transmisión de 14.4 Mbps en el *downlink* y 5.7 Mbps en el *uplink*.

1.2.4 CUARTA GENERACIÓN 4G [23]

Los sistemas de cuarta generación 4G se caracterizan por brindar servicio de Internet móvil de alta velocidad. El principal estándar que cumple con los requisitos impuestos por la IMT[6]-Avanzada es LTE-A, el cual es una evolución del estándar LTE, permitiendo alcanzar velocidades teóricas de 150 Mbps en el enlace de *downlink* y 50 Mbps en el *uplink.*

1.3 LONG TERM EVOLUTION (LTE)

El principal exponente de la tecnología de cuarta generación en Ecuador es LTE-Advanced, mismo que se encuentra implementado en el país en las principales ciudades conforme a lo publicado en las respectivas páginas web de los operadores de SMA (Servicio Móvil Avanzado)

Para el presente estudio, el estándar 4G al que se hará referencia es LTE-A, ya que como se mencionó es el estándar que se encuentra en operación.

Es importante indicar que para comprender la tecnología LTE-A, es necesario entender la procedencia o evolución de la misma, por lo tanto, a continuación, se procederá a revisar las características más relevantes de LTE.

Para que un estándar sea considerado como de cuarta generación debe cumplir con ciertas características establecidas por la ITU-R (*International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector*) para IMT-Avanzada (*International Mobile Telecommunications-Advanced*), dichas características se presentan en la Tabla 1.1.

[6] IMT: Son requisitos emitidos por el UIT-Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) para sistemas de cuarta generación.

Parametro	downlink	uplink
Ancho de banda	40 MHz	
Eficiencia espectral pico (bps/Hz)	15	6,75
Eficiencia espectral promedio (bps/Hz/celda)	3(Interiores)/2,6(Micro Urbano) /2,2(Macro Urbano) /1,1 (Rural)	2,25(Interiores)/1,8(Micro Urbano) /1,4(Macro Urbano) /0,7(Rural)
Eficiencia espectral por usuario en el borde de la celda (bps/Hz)	0,1(Interiores)/0,075(Micro Urbano) /0,06(Macro Urbano) /0,04(Rural)	0,07(Interiores)/0,05(Micro Urbano) /0,03(Macro Urbano) /0,015(Rural)
Capacidad de VoIP (usuario/celda/MHz)	50(Interiores)/40(Urbano)/30(Rural)	
Latencia en el plano de usuario (ms)	10	
Latencia en el plano de control (ms)	100	

Tabla 1.1 Requisitos mínimos para tecnologías 4G establecidos por la ITU-R [4]

1.3.1 EVOLUCIÓN DEL ESTÁNDAR LTE [4][5]

El primer estándar de la tecnología LTE fue introducido por la 3GPP (*3rd Generation Mobile System*) y es el correspondiente al *Release* 8, disponible desde el año 2009. En la Figura 1.2 se presenta de forma gráfica la evolución de los *Release* involucrados en LTE. Es necesario aclarar que el *Release* 14 no se considera para el estudio, debido a que representa el inicio de tecnologías de quinta generación.

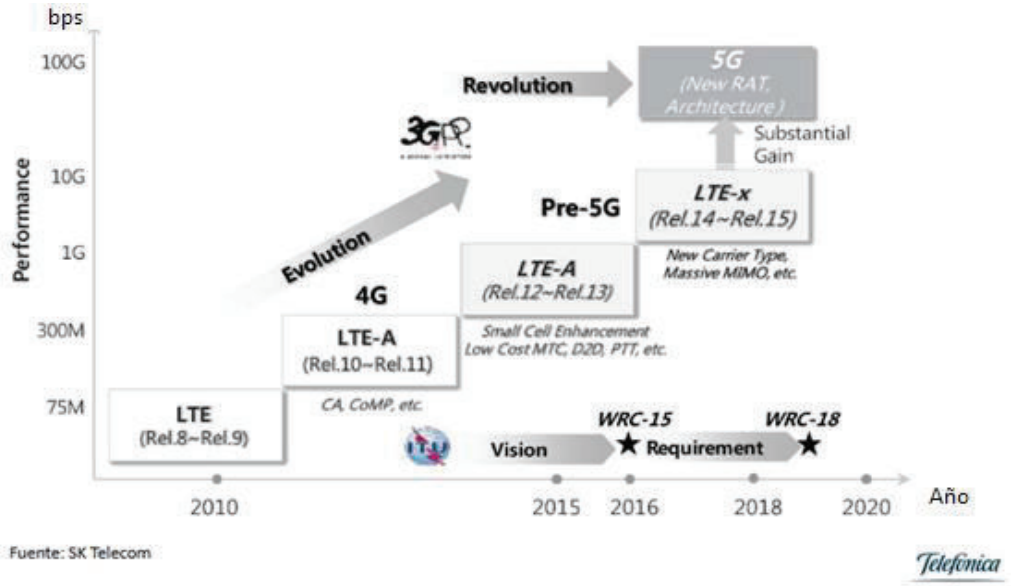

Figura 1.2 Evolución del estándar LTE [3]

A continuación, se describen las características técnicas más relevantes de los diferentes *Release.*

1.3.1.1 Release 8 [4]

La versión 8 introdujo LTE por primera vez, con una interfaz de radio y un *core* de red completamente nuevos, lo que permitió mejorar considerablemente el rendimiento de los datos en comparación con los sistemas anteriores. Las principales características incluyen:

- Velocidades pico teóricas de 300 Mbps en el enlace descendente y 75Mbps en el enlace ascendente.
- Latencia de hasta 10ms.
- Implementación en anchos de banda de 1,4, 3, 5, 10, 15 y 20MHz, permitiendo diferentes escenarios de implementación.
- Acceso múltiple de dominio de frecuencia ortogonal (OFDMA[7]) en el enlace descendente.
- Acceso múltiple de dominio de frecuencia de una sola portadora (SC-FDMA[8]), en el enlace ascendente.
- Uso de la tecnología de Múltiples Entradas Múltiples Salidas (MIMO, Multiple Input Multiple Output).
- Uso del protocolo IP en el core de la red y la arquitectura *System Architecture Evolution* (SAE[9]).

1.3.1.2 Release 9 [4]

La versión 9 introdujo varias mejoras a las características introducidas en la versión 8, de las cuales se describen a continuación:

- Introducción de femtoceldas[10] LTE en forma de eNodeB Home (HeNB).
- Características de auto organización, tales como la optimización del canal de acceso aleatorio.

---

[7] OFDMA Es una técnica de acceso múltiple que se logra asignando subconjuntos de subportadoras a usuarios individuales.
[8] SC-FDMA es un esquema de acceso múltiple que utiliza modulación de portadora única,
[9] Sistema de Evolución de la Arquitectura (SAE): Es la arquitectura de red central del estándar de comunicación inalámbrica LTE de 3GPP.
[10] Celdas con niveles de cobertura pequeños que permiten cubrir zonas con características de alto nivel de usuarios o pequeñas zonas sin cobertura.

- *Evolved multimedia broadcast and multicast service* (eMBMS[11]), para la entrega eficiente del mismo contenido multimedia a múltiples destinos.
- Servicios de ubicación, para localizar un dispositivo móvil.

1.3.1.3 Release 10 [4]

La versión 10 proporcionó un aumento significativo a la capacidad y rendimiento del sistema LTE, y así como una mejora en el rendimiento del sistema para dispositivos móviles situados a cierta distancia de una estación base. Las características más importantes de este *Release* incluyeron:

- Velocidades pico teóricas de 3 Gbps en el enlace descendente y 1.5 Gbps en el enlace ascendente.
- Agregación de portadora[12] (CA, Carrier Aggregation), permitiendo la combinación de hasta cinco portadoras independientes para permitir anchos de banda de hasta 100MHz.
- Configuraciones de antena MIMO de orden superior, hasta 8 × 8 enlace descendente y 4 × 4 enlace ascendente.
- Nodos de retransmisión para soportar redes heterogéneas denominadas *HetNets*[13], que contienen una amplia variedad de tamaños de celda.
- Mejora en la coordinación de interferencias inter-celdas (CIC- por sus siglas en ingles), que producen una mejora en el rendimiento hacia el borde de las celdas.

1.3.1.4 Release 11 [4]

La versión 11 se basó en la plataforma de la versión 10 empleando una serie de mejoras a las capacidades existentes, tales como:

- Mejoras a la agregación de portadoras, MIMO, inclusión de nodos de retransmisión y la coordinación entre interferencias inter-celdas.

---

[11] Multimedia Broadcast Multicast Servicios (MBMS) es una especificación punto a multipunto de la interfaz redes celulares de la 3GPP, que está diseñado para proporcionar una entrega eficiente de difusión y multidifusión de servicios.
[12] Agregación de portadora: Es una funcionalidad clave de LTE-Advanced que les permite a los operadores crear mayores anchos de banda virtuales.
[13] HetNets: Es una red que se encuentra conformada por múltiples tecnologías de acceso de radio, arquitecturas, soluciones de transmisión y estaciones base de diversas potencias de transmisión.

- Transmisión y recepción multipunto coordinada, para permitir la comunicación simultánea con múltiples celdas.
- Receptores avanzados que permiten la detección multiusuario y la aplicación de antenas adaptivas inteligentes que permiten incrementar la capacidad y/o cobertura.

1.3.1.5 Release 12 [4]

Las características de la versión 12 se discutieron en un taller 3GPP en Eslovenia en junio de 2012. Un requisito primordial fue la necesidad de apoyar el rápido aumento en el uso de datos móviles, algunas de las características incluyen:

- Celdas de menor tamaño mejoradas para LTE y la introducción de una serie de características para mejorar el apoyo de *HetNets.*
- Agregación de portadoras entre sitios, para mezclar y combinar las capacidades y el *backhaul*[14] de celdas adyacentes.
- Nuevas técnicas de antenas y receptores para maximizar el potencial de las celdas grandes.
- *Interworking* entre LTE y WiFi o HSPDA.

1.3.1.6 Release 13 [5]

El trabajo del *Release* 13 se centra en la agregación de una celda primaria[15], que opera en espectro con licencia para proporcionar información crítica y calidad de servicio garantizada, y de una celda secundaria, que opera en un espectro sin licencia para aumentar oportunamente la velocidad de transmisión de datos. Las principales mejoras de estas redes son:

- Agregación de portadoras, permitiendo la agregación de más de 5 portadoras.
- Se define un nuevo tipo de categoría de UE[16] de baja complejidad que soporta ancho de banda reducido, potencia de transmisión reducida, soporte reducido para modos de transmisión de enlace descendente,

---

[14] *Backhaul:* Es la porción de una red jerárquica que comprende los enlaces intermedios entre el núcleo (o backbone), y las subredes en sus bordes.
[15] Celda primaria: Definición introducida en el *Realese* 13 para identificar celdas que trabajan con espectro licenciado.
[16] UE: Equipo de usuario dispositivo que permite a los usuarios al acceso a servicios prestados por la red

duración de batería ultra larga a través de técnicas de reducción de consumo de energía y operación de cobertura extendida.

- Técnicas mejoradas de transmisión multiusuario.

En resumen, LTE-A presenta las características que se indican en la Tabla 1.2.

Parámetro	Down link	Up link
Ancho de banda	hasta 100MHz	
Velocidad de transmisión pico (Mbps)	1000	500
Eficiencia espectral pico (bps/Hz)	30	15
Eficiencia espectral promedio (bps/Hz/celda)	2,6	2
Eficiencia espectral por usuario en el borde de la celda (bps/Hz)	0,009	0,07
Capacidad de VoIP (usuario/celda/MHz)	Superior a la versión 8 de LTE	
Latencia en el plano de usuario (ms)	10	
Latencia en el plano de control (ms)	50 (De espera a Activo) 10 (De inactivo a Activo)	

Tabla 1.2 Especificaciones presentadas por el estándar LTE-*Advanced* [4]

1.4 ARQUITECTURA DE LA TECNOLOGIA LTE 4G [1]

Como la tecnología LTE- *Advanced* es una evolución de LTE sus arquitecturas son muy similares, la diferencia radica en que LTE-*Advanced* añade una arquitectura adicional implementada en la red de acceso, relacionada con el uso de nodos de retransmisión.

La arquitectura de LTE-A se encuentra conformada por cuatro bloques funcionales los cuales serán objeto de estudio en la siguiente sección, estos bloques son: la E-UTRAN (*Evolved - UMTS Terrestrial Radio Access Network*), la EPC (*Evolved Packet Core*), la plataforma de servicios IMS (IP-*Multimedia Subsystem*) y el equipo de usuario. La arquitectura de LTE-A se muestra en la Figura 1.3.

Dentro de cada uno de los bloques se encuentran las entidades de red[17] e interfaces que permiten la comunicación entre los equipos, en las redes de acceso, de core y externas.

[17] Entidades de red: Se refiere de forma genérica a él o los elementos de la red que cumplen cierta función dentro de la misma.

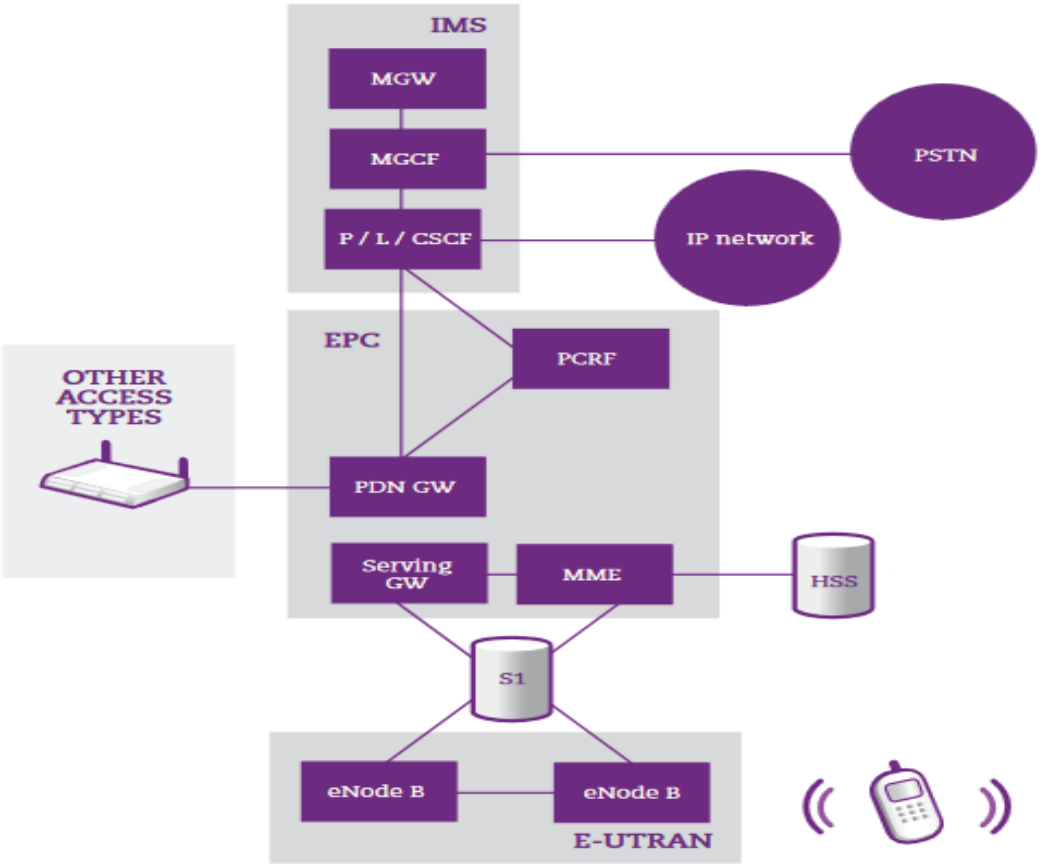

Figura 1.3 Arquitectura de LTE-Advanced [7]

1.4.1 RED DE ACCESO TERRESTRE EVOLUCIONADA UNIVERSAL (E-UTRAN)

La red de acceso está conformada por la entidad de red denominada evolved NodeB (eNB). Es decir, el único componente por el cual se encuentra conformado la E-UTRAN es la estación base. A diferencia de tecnologías anteriores en las que la red de acceso se encontraba compuesta además por equipos controladores.

1.4.1.1 Evolved NodeB (eNB)

El eNB es el encargado de brindar conectividad entre los equipos de los usuarios (UE, *User Equipment*) y la Red Troncal de Paquetes Evolucionada (EPC, *Evolved Packet Core*). El eNB usa las interfaces Uu[18], S1[19] y X2[20] para

[18] Uu: Interfaz que permite la comunicación entre en eNBs y el equipo de usuario.
[19] S1: Interfaz que permite la comunicación entre los eNBs y el EPC.
[20] X2: Interfaz que permite la comunicación entre los eNBs

comunicarse con los demás elementos del EPC, tal como se indica en la Figura 1.4.

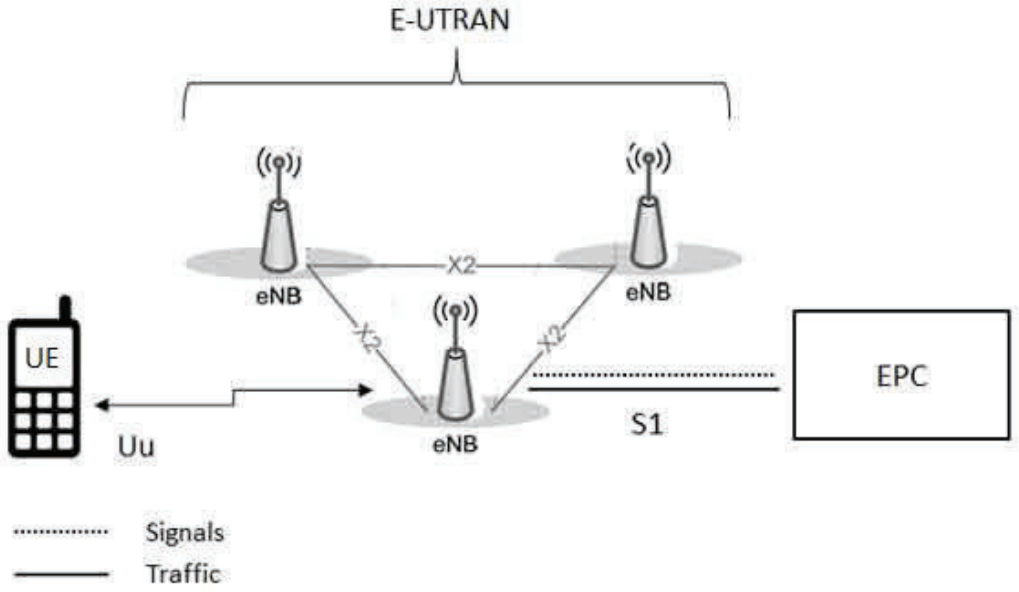

Figura 1.4 Red de acceso E-UTRAN [8]

El eNB es el equivalente a una estación base y abarca todas las funciones de la red de acceso E-UTRAN. Los protocolos entre la UE y el eNB se llaman protocolos de capa de acceso AS (*Access Stratum*).

Los eNB contienen la capa física, MAC (*Medium Access Control*[21]), RLC (*Radio Link Contro*[22]*l*) y PDCP (*Packet Data Control Protocol*[23]) que incluyen las funcionalidades del plano de usuario, de compresión, de cabecera y encriptación.

La capa RRC (*Radio Resource Control*[24]), es una capa que existe entre el UE y el eNB a nivel de IP, la cual se encarga del control de admisión, *scheduling*[25], cifrado y descifrado de los datos del plano de usuario y de control.

---

[21] MAC; Conjunto de mecanismos y protocolos de comunicaciones a través de los cuales varios dispositivos se ponen de acuerdo para compartir un medio de transmisión común.
[22] RLC: Es un protocolo de capa 2 utilizado en UMTS y LTE en la interfaz de aire
[23] PDCP: Se encuentra en la pila de protocolo de radio en el UMTS y LTE interfaz de aire en la parte superior de la capa RLC.
[24] RRC: Protocolo que maneja el plano de control de señalización de la Capa 3 entre el equipo de usuario (UE) y la Red de Acceso Radio.
[25] Scheduling: Asignación de los recursos radio tanto en el enlace de *uplink* como *downlink* de forma dinámica

Por medio de los protocolos propios de cada capa de red, el eNB realiza la transmisión de paquetes IP hacia los equipos de usuario y viceversa, además de mensajes de señalización necesarios para controlar la operación de la interfaz radio. El servicio de transferencia de paquetes IP entre un eNB y un equipo de usuario se denomina servicio portador de radio (*Radio Bearer*, RB).

El eNB realiza funciones de control de admisión de los servicios portadores radio, control de movilidad, asignación de los recursos radio tanto en el enlace de *uplink* como *downlink* de forma dinámica, a esta asignación dinámica se la conoce como *scheduling*; control de interferencias entre estaciones base, control de los mensajes que envían los equipos de usuario para mejorar la gestión de los recursos, entre otros.

Otra de las funciones del eNB es encaminar tráfico de los usuarios hacia las entidades de red correspondientes a la Red Troncal de Paquetes Evolucionada, y establecer varias conexiones con entidades pertenecientes al EPC.

1.4.1.2 Nodos de retransmisión [9]

Los nodos de retransmisión son básicamente eNBs de potencia baja que proporcionan mayor cobertura y capacidad en las fronteras de las celdas o en donde se requiera. Lo que significa extender la cobertura con costos bajos comparados con instalar un eNB normal.

El nodo de retransmisión se encuentra conectado a un eNB donante a través de la interfaz de radio, es decir el eNB donante también brinda servicio a los UE que se encuentran conectados al nodo de retransmisión. Para que el nodo de retransmisión pueda conectarse a la eNB donadora, es necesario que el nodo tenga características de la funcionalidad de un UE, de tal forma que pueda conectarse inalámbricamente al eNB donante.

Como se observa en la Figura 1.5 la interfaz inalámbrica que permite la conexión entre el eNB y el nodo repetidor es la **Un** la misma que es una variante de la interfaz **Uu**. Cuando la interfaz **Uu** usa diferente frecuencia que la **Un** se conoce como tipo 1a y cuando las frecuencias de las interfaces son diferentes se conoce como tipo 1, pero en este caso existe la posibilidad de que se produzca auto interferencia. Para evitar esto se utilizan *slots* de tiempo para la transmisión de

cada interfaz, o ubican tanto al transmisor como al receptor para que no produzcan interferencia.

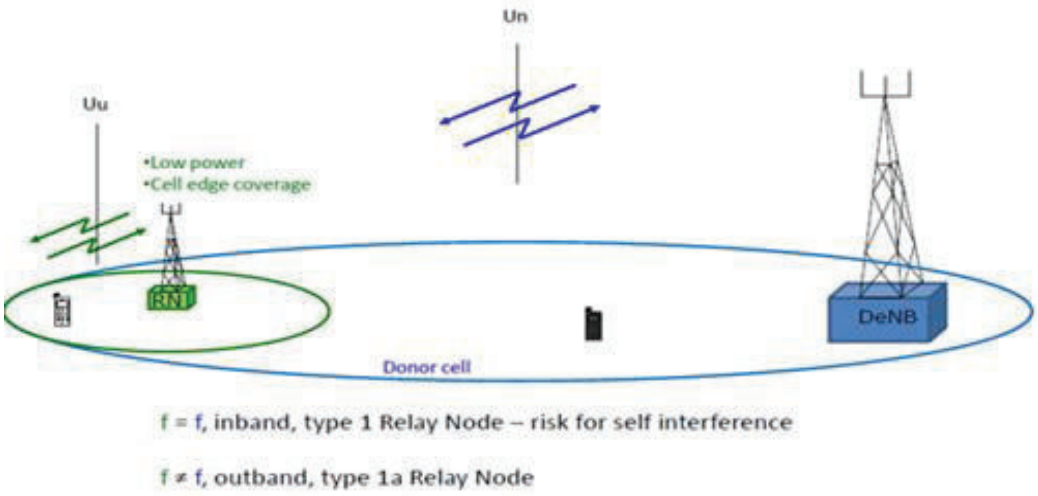

Figura 1.5 Nodo de retransmisión [9]

1.4.1 RED TRONCAL DE PAQUETES EVOLUCIONADA (EPC) [10] [11]

La red troncal fue diseñada con el objetivo de proporcionar un servicio de conectividad IP, usando una arquitectura de red que permita explotar las características que ofrece la red de acceso E-UTRAN.

Como se puede ver en la Figura 1.6, la red troncal EPC se encuentra formada por las entidades MME (*Mobility Management Entity*), S-GW (*Serving Gateway*) y P-GW (*Packet Data Network Gateway*). Estas tres entidades junto con la base de datos principal de los sistemas 3GPP denominada HSS (*Home Subscriber Server*), conforman la estructura básica de la red EPC.

Las funciones asociadas al plano del usuario se encuentran en las entidades S-GW y P-GW mientras que para funciones y señalización del plano de control la entidad encargada es la MME.

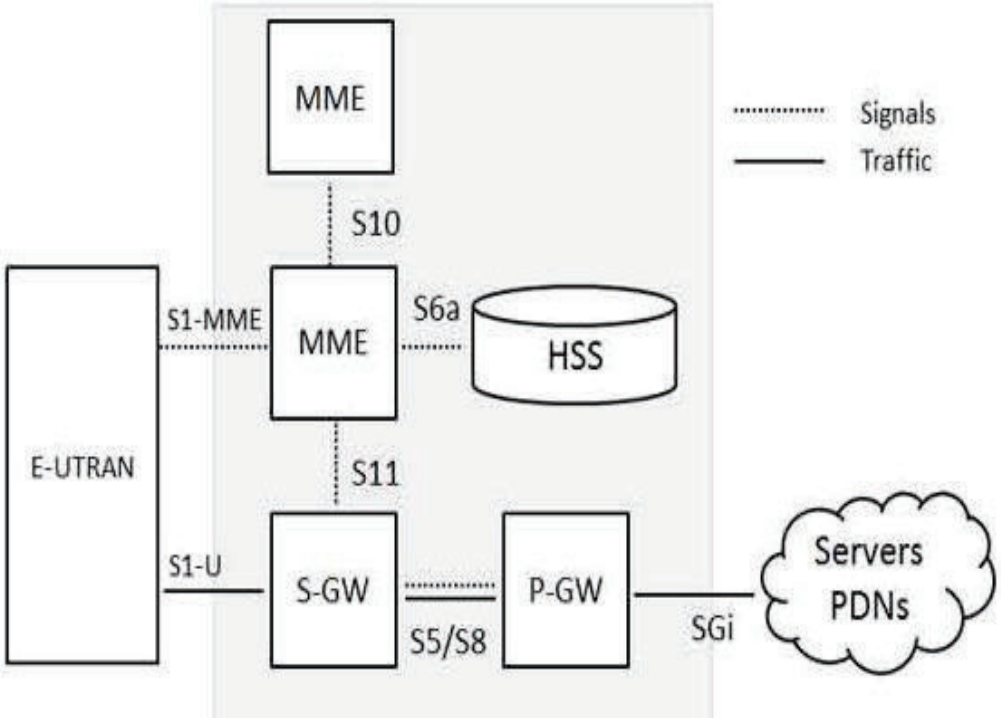

Figura 1.6 Arquitectura básica de la red EPC [8]

A continuación, se muestra una breve descripción de cada uno de los componentes mostrados anteriormente en la Figura 1.6 de la Red Troncal de Paquetes Evolucionada:

- El *Home Subscriber Server* (HSS) se ha heredado de tecnologías previas como UMTS y GSM, es una base de datos central que contiene información sobre todos los abonados del operador de red.
- La puerta de enlace de red de paquetes de datos (P-GW) permite la comunicación con el mundo exterior, es decir con redes *Packet Data Networks*[26] (PDN) utilizando la interfaz SGi[27]. Cada red de paquetes de datos (PDN) se identifica mediante un nombre de punto de acceso (APN - *Access Point Name*).

[26] PDN: Redes de datos externas a la red LTE, mismas que proporcionan respuesta a peticiones de los UE.
[27] SGi: Es el punto de referencia entre el elemento de salida a internet de nuestra red y la red de paquetes de datos

- La puerta de enlace de servicio (S-GW) actúa como un enrutador y reenvía datos entre la estación base y la puerta de enlace PDN, a través de las interfaces S5[28] y S8[29].
- La entidad de gestión de movilidad (MME) controla la operación del móvil por medio de mensajes de señalización y del *Home Subscriber Server* (HSS).
- La interfaz S11 permite la unión entre el Serving Gateway y la MME, la interfaz S10 permite la comunicación entre las entidades MME y la interfaz S6 permite la transferencia de datos de suscripción y autenticación entre MME y HSS para autenticar / autorizar el acceso de los usuarios al sistema evolucionado [11].

En los siguientes apartados se presenta la descripción de los principales componentes de la red EPC.

1.4.1.1 MME (*Mobility Management Entity*) [10]

La MME es el elemento principal del plano de control de la red LTE, encargado del control del acceso de los terminales a través de la E-UTRAN. A todos los terminales que tengan acceso a través de la E-UTRAN y que se encuentren registrados en la red LTE se les asigna una entidad de gestión de la movilidad (MME).

La selección de la MME se realiza en base a criterios de balanceo de carga y ubicación geográfica. La MME asociada mantiene información del usuario usada para autenticar y brindar servicio a los usuarios. Las principales funciones de la MME son:

- Autenticación de los usuarios conectados a la E-UTRAN con la ayuda de la información disponible en la base de datos HSS. La MME se encarga de identificar, autenticar y autorizar a los usuarios.
- La MME es la encargada de la administración de servicios portadores, es decir, del establecimiento, permanencia, alteración y liberación de los

[28] S4: Provee control entre el Serving Gateway y el PDN gateway ubicados en la misma red.
[29] S8: Provee control entre el Serving Gateway y el PDN gateway ubicados en diferentes redes.

servicios asociados a un usuario sobre los que se realiza el envío de paquetes IP entre la red externa y el equipo de usuario.

- Administración de movilidad de los usuarios que se encuentran en modo IDLE[30], para lo cual, la MME se encarga de mantener actualizada la información de la ubicación de los usuarios dentro de las áreas de servicio de la red, para esto se establecen áreas de seguimiento y procedimientos asociados a las mismas. Los modos en que el UE se puede encontrar son IDLE, conectado y desconectado.
- Señalización para gestión de movilidad entre el EPS (*Evolved Packet system*)[31] y redes 3GPP, la información intercambiada en el proceso de señalización se usa también para implementar mecanismos de movilidad conjunta, esto quiere decir que las entidades EPC y GPRS intercambian información relativa a áreas de seguimiento.
- La señalización se realiza a través de la interfaz denominada S3 entre MME y SGSNs.

1.4.1.2 S-GW (Serving Gateway)

La entidad S-GW proporciona la comunicación entre la red de acceso E-UTRAN y red troncal EPC, por lo que proporciona un punto de acceso a la red troncal EPC. Esto significa que un proceso de handover[32] entre eNBs solo implica un cambio de los eNBs involucrados y el S-GW asociado.

El S-GW también proporciona almacenamiento de paquetes IP en caso de que los equipos de los usuarios se encuentren en modo IDLE, esto por un período de tiempo corto, con lo que es posible que dichos usuarios reciban los paquetes en caso de no estar disponibles. Si el equipo de usuario no está conectado al eNB y llega tráfico dirigido al usuario al S-GW asignado, el S-GW lo almacena temporalmente, mientras que con la señalización respectiva la MME procede al restablecimiento de conexión con el equipo terminal.

---

[30] IDLE: Es el modo en el que el UE se encuentra después de encenderlo y es percibido por la red, es un estado de espera.
[31] EPS: Evolved Packet system: Nombre global de la 3GPP para todo el sistema, incluyendo E - UTRAN, EPC y equipos de usuario.
[32] Handover: Es el sistema utilizado en redes de comunicación móvil celular para transferir el servicio de un usuario de una radio base a otra o en los sectores de una misma radio base.

El tráfico de los usuarios atraviesa el S-GW por lo que presenta funciones de enrolamiento usadas para dirigir el tráfico ascendente hacia el o los gateways (P-GW) correspondientes. Cabe mencionar que el usuario puede tener una o varias sesiones con gateways (P-GW) pero únicamente tiene asociado una única entidad S-GW.

1.4.1.3 P-GW (PDN Gateway)

Es la entidad encargada de proporcionar conectividad entre la red LTE y redes externas, denominadas PDN (Packet Data Network), es decir que a través de la P-GW el usuario resulta visible a redes externas.

La P-GW permite la aplicación de reglas de uso de red y control de tarifación a los servicios portadores que tenga establecido el terminal del usuario. La dirección IP usada en una determinada red externa es asignada por la entidad P-GW correspondiente.

El tráfico que cursa por la P-GW es procesado a través de un conjunto de filtros que permiten asociar cada paquete IP con el usuario y el servicio portador EPC correspondiente, lo que permite aplicar reglas de uso y tarifación, además de funciones de inspección y verificación de la validez de los paquetes IP. De esta manera es posible descartar paquetes de características anómalas, es decir, paquetes de usuarios enviados a direcciones IP y puertos no autorizados.

1.4.1.4 HSS (Home Subscriber Server)

El HSS es la base de datos que alberga la información de los usuarios de la red. La información que almacena el HSS abarca la información relativa al registro del usuario en la red e información usada para la operación de la red. La base de datos es consultada y modificada desde las entidades de red encargadas de brindar los servicios de conectividad y servicios a usuarios finales.

La información almacenada en la base de datos contiene tanto información permanente que solo puede ser modificada mediante procesos administrativos, así como la información temporal que es modificada como resultado del normal funcionamiento de la red.

1.4.2 IMS (IP MULTIMEDIA SUBSYSTEM) [10]

El subsistema IMS proporciona mecanismos de control usados para brindar servicios de comunicación multimedia empleando el protocolo IP. El subsistema IMS se encuentra constituido por una serie de elementos como, servidores, bases de datos y gateways, que se comunican entre sí mediante varios protocolos, principalmente estándares de IETF, los mismos que permiten gestionar la provisión de servicios tales como, voz y video sobre IP, mensajería instantánea, servicio de llamadas en grupo, entre otros.

1.4.3 EQUIPOS DE USUARIO [10]

El equipo de usuario es el dispositivo móvil que permite el acceso a la red y a los servicios que presta la misma. La arquitectura funcional de un equipo de usuario se muestra en la Figura 1.7.

El equipo se encuentra constituido por dos elementos básicos los cuales son: Un módulo de suscripción del usuario (SIM/USIM) y el equipo móvil propiamente dicho (*Mobile Equipment,* ME). Las funciones del equipo de usuario se encuentran concentradas en dos entidades: El terminal movil (*Mobile Terminal*, MT) y el equipo terminal (*Terminal Equipment*, TE).

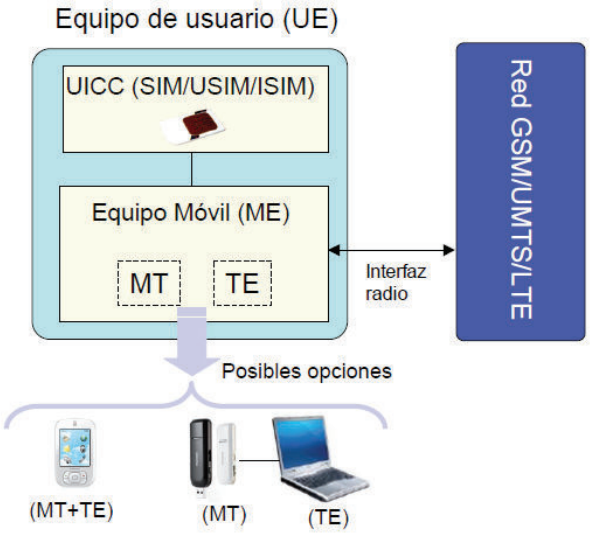

Figura 1.7 Arquitectura del equipo de usuario [10]

El módulo de suscripción de usuario (SIM) cumple sus funciones a través del uso de una tarjeta inteligente (UICC- *Universal Integrated Circuit Card*) que contiene la aplicación encargada de gestionar los datos para la suscripción de usuarios en las redes 3GPP.

La aplicación que permite el acceso a redes GSM es denominada SIM (Subscriber Identity Module), por el lado de redes UMTS es conocida como UMTS SIM o USIM. Adicional a las aplicaciones SIM y USIM la tarjeta inteligente UICC puede contener la aplicación ISIM (IP Multimedia Services Identity Module) que almacena datos necesarios para la operación de servicios IMS.

La SIM/USIM se encuentra asociada a cada usuario independiente del dispositivo móvil, lo que significa que el usuario puede cambiar su terminal y mantener la misma identidad en la red. Para LTE se ha mantenido la compatibilidad con redes previas y la aplicación correspondiente continúa siendo la USIM, sin embargo, USIM usada para acceder a la red LTE añade parámetros adicionales, por ejemplo, las nuevas claves de seguridad soportadas en LTE. Para mayor detalle se puede encontrar la descripción de la USIM en la especificación TS 31.102 [22].

El equipo móvil (ME) integra funciones propias de comunicación con la red LTE, así como funciones adicionales (aplicaciones disponibles para los teléfonos inteligentes) que permiten la integración del usuario con los servicios de la red.

En el diseño del equipo móvil, se ha definido una interfaz, denominada HDLC_PPP que permite la separación física entre el equipo encargado de las funciones propias de comunicación (MT- *Mobile Termination*) y el equipo que se ocupa de la interacción con el usuario (TE - *Terminal Equipment*). Dicha interfaz es una especificación del conjunto de comandos AT[33] que permiten acceder a los servicios.

1.4.3.1 Categorías de equipos de usuario [10]

Las categorías de los terminales móviles se definen en función de la capacidad MIMO, la máxima velocidad de transmisión pico y la capacidad de procesamiento

[33] AT: Conjunto de comandos para configurar y parametrizar módems. Los caracteres AT corresponden a la palabra Atención

del terminal móvil. En particular, en la primera versión del sistema LTE (Release 8) se han definido 5 categorías de terminal, para LTE-A se definen 9 categorías (Release 10, 11 y 12), en la Tabla 1.3 se definen las características más relevantes de las diferentes categorías de terminales móviles tanto para el enlace ascendente como para el descendente.

Categoría	**Velocidad máx. bajada (Mbps)**	**Velocidad. máx. subida (Mbps)**	**3GPP *Release***
1	10	5	Release 8
2	50	25	Release 8
3	100	50	Release 8
4	150	50	Release 8
5	300	75	Release 10
6	300	50	Release 10
7	300	150	Release 10
8	1200	600	Release 10
Categoría	Velocidad máx. bajada (Mbps)	Velocidad. máx. subida (Mbps)	3GPP *Release*
9	450	50	Release 11
10	450	100	Release 11
11	600	50	Release 11
12	600	100	Release 11
13	390	50	Release 12
14	390	100	Release 12
15	3900	1500	Release 12

Tabla 1.3 Parámetros de capa física del terminal móvil [33]

1.5 TECNOLOGÍAS USADAS A NIVEL FÍSICO [10]

La tecnología LTE-A usa a nivel físico las técnicas de acceso múltiple OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) para el enlace descendente y SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) para el enlace ascendente. Con estas técnicas de acceso es posible conseguir mayores niveles de capacidad y eficiencia en el uso de los recursos de radio.

Es indispensable primero entender la técnica OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) en la cual se basan las técnicas de acceso múltiple usadas en la tecnología LTE-A.

1.5.1 OFDM

OFDM es un esquema de modulación o multiplexación multiportadora en el cual se emplea un alto número de subportadoras para transmitir información de datos y control, denominados símbolos, sobre cierto ancho de banda.

En esta modulación se emplean portadoras que cuentan con propiedades de ortogonalidad, por lo que es posible realizar la transmisión simultánea de todos los símbolos y separarlos en recepción. Cada subportadora es modulada individualmente usando esquemas de modulación convencionales como son PSK (Phase Shift Keying, Modulación por desplazamiento de fase) y QAM (Quadrature Amplitude Modulation, Modulación De Amplitud En Cuadratura).

Las portadoras individuales se conocen como subportadoras y el conjunto de todas las subportadoras es conocida como portadora OFDM. El principal parámetro es el tiempo de duración de un símbolo el mismo que es inversamente proporcional a la separación entre subportadoras, en la Figura 1.8 se muestra un ejemplo de cuatro subortadoras separadas un Δf.

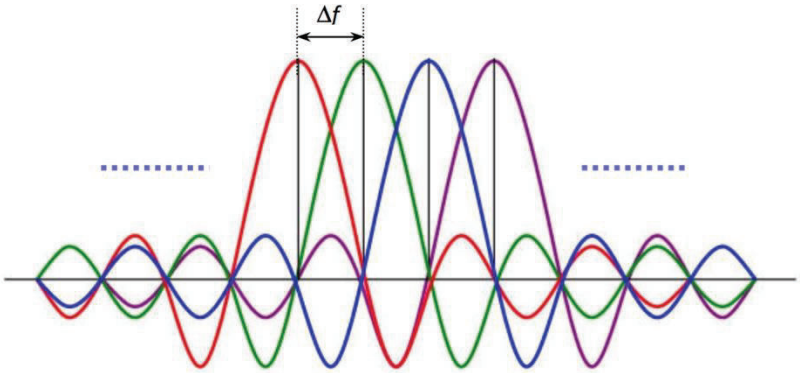

Figura 1.8 Cuatro subportadoras formando una portadora OFDM. [12]

La propagación de señales en un ambiente inalámbrico es afectada por fenómenos como la reflexión, difracción, propagación multi trayectoria, etc. Las condiciones en las que se encuentre el terminal móvil en el momento de transmisión y recepción también influyen. Estos fenómenos provocan que la señal recibida tenga variaciones de amplitudes y fase. Por lo que, la transmisión a través del medio inalámbrico produce pérdida de ortogonalidad entre las subportadoras. Para evitar esta interferencia, se coloca un tiempo de protección

(Tp) en el inicio de la señal, durante el cual se repite el final de la señal, tal y como se muestra en la Figura 1.9.

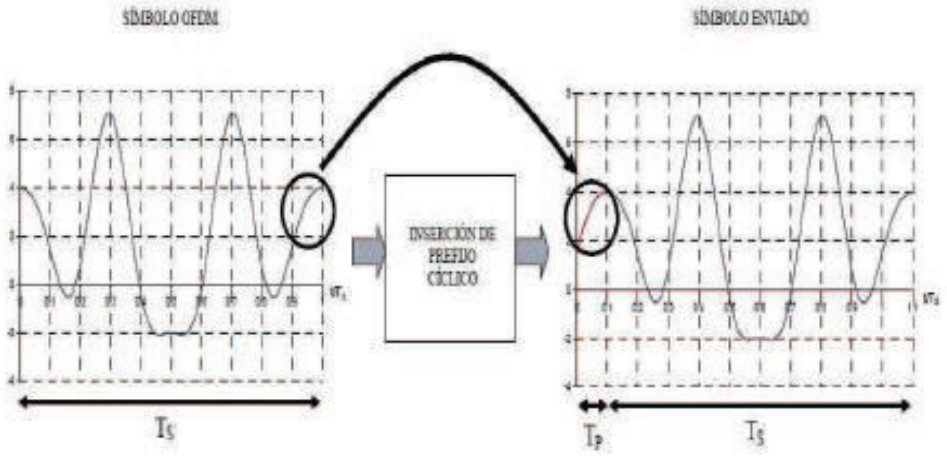

Figura 1.9 Inserción de Prefijo cíclico. [13]

1.5.2 OFDMA

Se usa la técnica OFDMA es usada debido a que permite que los diferentes símbolos modulados en diferentes subportadoras sean asignados a diferentes usuarios. De esta manera, es posible el envío de varios flujos de información, pertenecientes a diferentes usuarios, a través de varias subportadoras de manera simultánea, este concepto se ilustra en la Figura 1.10. De forma análoga en el receptor basta con recuperar la información de las subportadoras asignadas al terminal móvil para obtener la información perteneciente a cada usuario.

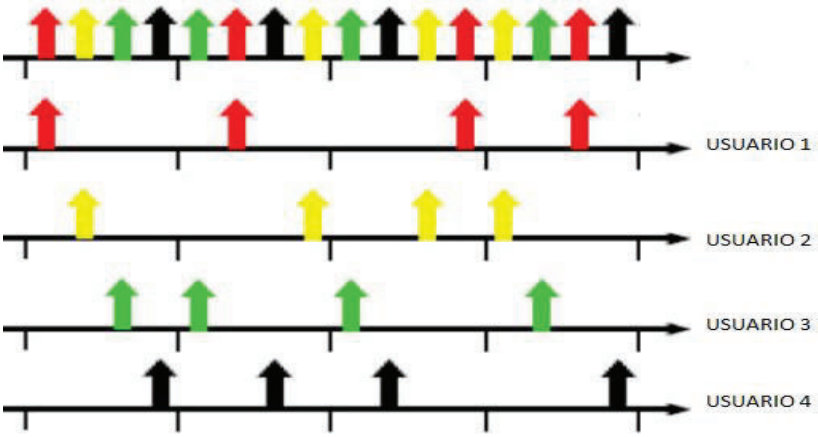

Figura 1.10 OFDMA multiplexación de usuarios [10]

Es necesario aclarar que no es indispensable asignar subportadoras consecutivas a los usuarios.

1.5.2.1 Procedimientos asociados a OFDMA

La técnica OFDMA con el objetivo de tener un uso eficiente de los recursos de radio subdivide la banda total disponible en subportadoras, las mismas que se conocen como los recursos de radio. Es necesario disponer de mecanismos de gestión que permitan la distribución de los recursos disponibles entre los diferentes usuarios y los servicios disponibles dependiendo de los requerimientos de calidad de servicio (QoS). Dichos mecanismos forman parte de la gestión de recursos de radio (Radio Resource Management RRM).

1.5.2.1.1 Programación de paquetes[34]

Mediante OFDMA es posible efectuar asignación dinámica de subportadoras a los usuarios, modificando los símbolos que se inyectan a cada una de las entradas del proceso de transformada inversa de Fourier discreta (IDFT) en transmisión, lo que permite que en períodos cortos de tiempo se pueda modificar las subportadoras usadas por cada usuario, proporcionando así la flexibilidad necesaria para poder cumplir diferentes requerimientos de QoS.

El mecanismo de programación de paquetes es el encargado de asignar las subportadoras o flujos disponibles a cada usuario. Estos paquetes o flujos de información son generados por diferentes servicios.

En la Figura 1.11, en la parte izquierda se observan datos pertenecientes a varios usuarios, representados mediante colores, los cuales ingresan al programador de paquetes, en donde se asigna a cada paquete una subportadora, un período de tiempo de transmisión, además del estado del canal y del requisito de calidad de servicio.

Para realizar la asignación de los recursos, el algoritmo de programación de paquetes toma en cuenta la información de los requisitos de QoS[35] para los diferentes usuarios. Por ejemplo, para servicios que precisen el envío de mayor

---

[34] Programación de paquetes: Es responsable de asociar los datos de los usuarios con el conjunto de subportadora/periodo de tiempo de transmisión.

[35] QoS: Es un conjunto de acciones o mecanismo de control usados en la reserva de recursos, para los diferentes tipos de tráfico.

información, los usuarios, deberán disponer de más recursos por una cantidad de tiempo mayor, tomando en cuenta información acerca del estado del canal y su respectiva asignación de subportadoras.

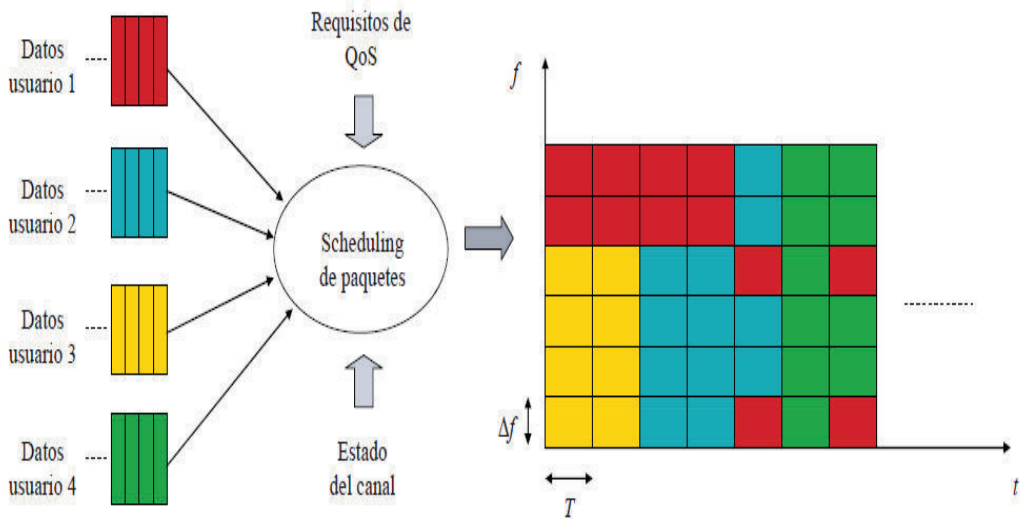

Figura 1.11 Scheduling de paquetes en OFDMA [10]

1.5.2.1.2 Adecuación del enlace

OFDMA no tiene ninguna condición sobre los símbolos a modularse, en consecuencia, pueden trabajar con modulaciones que generen más o menos bits de información por símbolo según el orden de la modulación empleada.

En el caso de usar una modulación QPSK, cada símbolo representa a dos bits de información, mientras que al usarse una modulación 16-QAM cada símbolo representa a cuatro bits de información y en el caso de usar una modulación M-QAM cada símbolo representara a M bits de información. Así la velocidad de transmisión resultante sobre una subportadora con duración de Ts, un prefijo cíclico Tp y una modulación con M bits de información por símbolo será igual a la ecuación 1.1.

$$R\left(\frac{bits}{s}\right) = \frac{log\ _2 M}{T_s + T_p} \qquad \textbf{Ec. 1.1}$$

Para incrementar la velocidad de transmisión se debería incrementar el número de bits por símbolo de la modulación. Sin embargo, por las condiciones de señal

a ruido (SNR) en el canal, las implementaciones de modulaciones de orden alto producen el incremento de la probabilidad de error de bits (BER - *Bit Error Rate*).

En OFDMA se emplea la técnica de adaptación del enlace (*link adaptation*), la cual busca extraer el máximo rendimiento del canal (en términos de velocidad de transmisión), este procedimiento se lo hace con el uso de selección de modulación que permita el envío de la mayor cantidad de bits por símbolo bajo determinadas condiciones de señal a ruido. Es decir, las portadoras que tengan una mejor relación SNR podrán implementar una modulación de orden mayor, tal como se ilustra en la Figura 1.12.

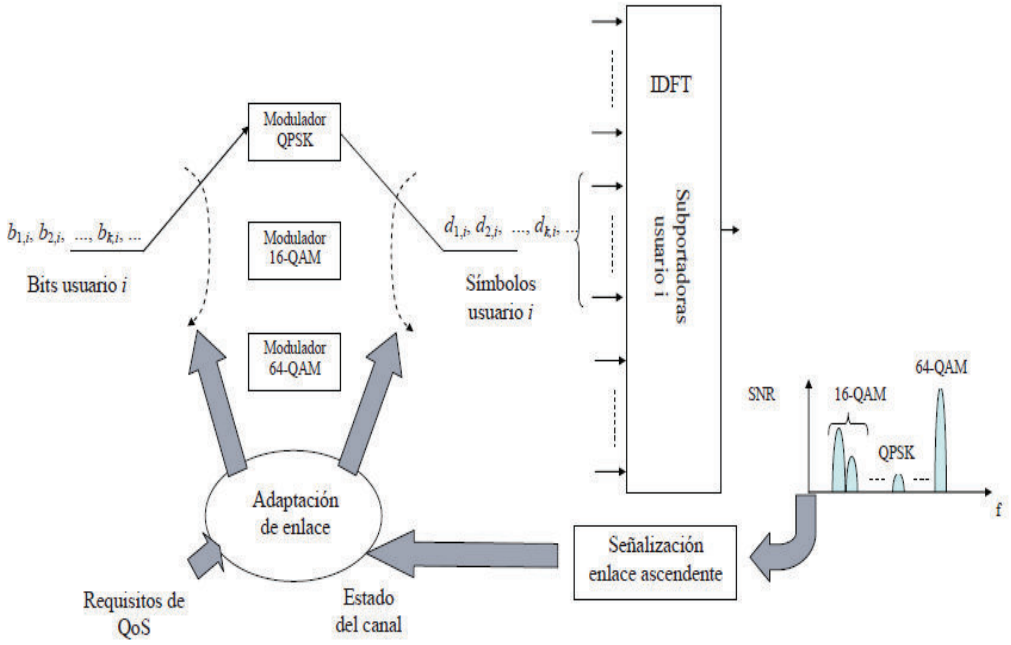

Figura 1.12 Adaptación de enlace en OFDMA [10]

La información que usa el mecanismo de adaptación del enlace, para realizar la selección de la modulación adecuada, es el estado del canal en función de la relación señal a ruido, la misma que es obtenida de mecanismos de señalización en el enlace ascendente. Adicionalmente, es necesaria la información de los requisitos de QoS, los cuales indican las características de velocidad que requieren los distintos tipos de tráfico.

1.5.3 SC-FDMA

La técnica SC-FDMA basa su funcionamiento en principios de transmisión muy similares a los de OFDM, pero efectúa una precodificación de los símbolos a transmitirse antes del proceso de transmisión OFDM, evitando así variaciones de potencia instantánea.

El esquema de banda base para SC-FDMA se muestra en la Figura 1.13. En la Figura se observa la transmisión de varios símbolos, los mismos que se precodifican mediante una transformada discreta de Fourier, posteriormente se procesan la etapa de multiplexación y luego se añade el prefijo cíclico.

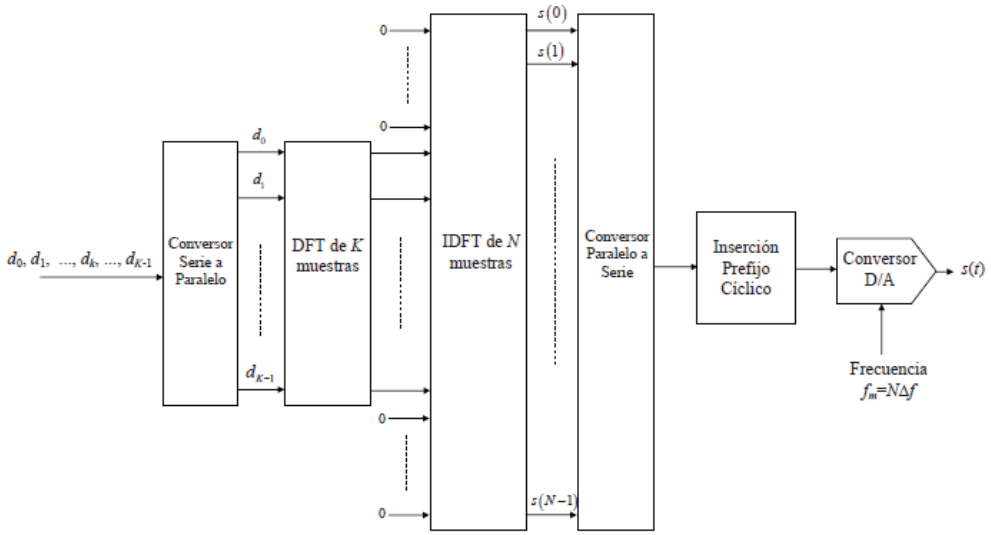

Figura 1.13 Transmisión de señal SC-FDMA [10]

Si el tamaño de la DFT (K) fuese igual al de la IDFT (N), es decir K=N, al pasar por los procedimientos de DFT y luego por IDFT la señal resultante sería igual a la que ingreso al procedimiento DFT, obteniéndose una señal de banda base no modulada sobre varias diferentes subportadoras, es decir una señal de portadora única que presenta mejores características de Peak-to-Average Power Ratio (PAPR[36]) que señales multiportadora.

Si se considera que K<N y las demás entradas de la IDFT se colocan a 0, se obtiene como resultado una señal que mantiene la propiedad de ser portadora única, y con un ancho de banda de $K*\Delta f = Kf_m / N$, es decir una señal regulable

[36] PAPR, Es el valor pico de la onda dividido para la raíz cuadrada de la forma de onda (RMS)

en el ancho de banda de acuerdo al valor de K, lo que proporciona la flexibilidad en el requerimiento de ancho de banda.

1.5.4 MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Las señales al ser transmitidas en un medio inalámbrico sufren alteraciones ocasionadas por diferentes obstáculos. Estos obstáculos presentan ciertos efectos como la reflexión, difracción y dispersión provocados por la propagación multitrayectoria.

La señal transmitida puede viajar por muchas trayectorias para llegar al destino, lo que provoca que las señales transmitidas lleguen desfasadas y atenuadas. En recepción la señal original se recupera como la suma de todas las señales recibidas, lo que puede originar desvanecimiento en dicha señal, disminución en la velocidad de transmisión y un aumento en el número de errores. Para contrarrestar estos fenómenos, que son propios del canal inalámbrico de transmisión, se desarrolló una técnica basada en múltiples antenas, la cual aprovecha la propagación muticamino, permitiendo incrementar la velocidad, cobertura y fiabilidad de las señales.

MIMO es una tecnología que usa múltiples señales que viajan simultáneamente y a la misma frecuencia por un canal de radiofrecuencia y aprovecha la propagación multi-camino e incrementa la eficiencia espectral del sistema de comunicaciones inalámbrico. Esto se logra usando diversidad de antenas, distintas técnicas y complejos algoritmos de tratamiento digital de señales en ambos extremos del enlace.

En la Figura 1.12 se muestran cuatro configuraciones de antenas tanto en transmisión como en recepción, mismas que se describen brevemente a continuación:

- SISO (*Single Input, Single Output*): Utiliza una antena transmisora y una antena receptora, como se muestra en la Figura 1.14 (a)
- MISO (*Multiple Input, Single Output*): Utiliza dos o más antenas transmisoras, pero solo una antena receptora, como se muestra en la Figura 1.14 (c)

- SIMO (*Single Input, Multiple Output*): Sistema que utiliza una sola antena de transmisión y dos o más antenas para recepción, como se muestra en la Figura 1.14 (b)
- MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*): Sistema de comunicaciones que utiliza dos o más antenas en el transmisor y dos o más antenas en el receptor, como se muestra en la Figura 1.14 (d)

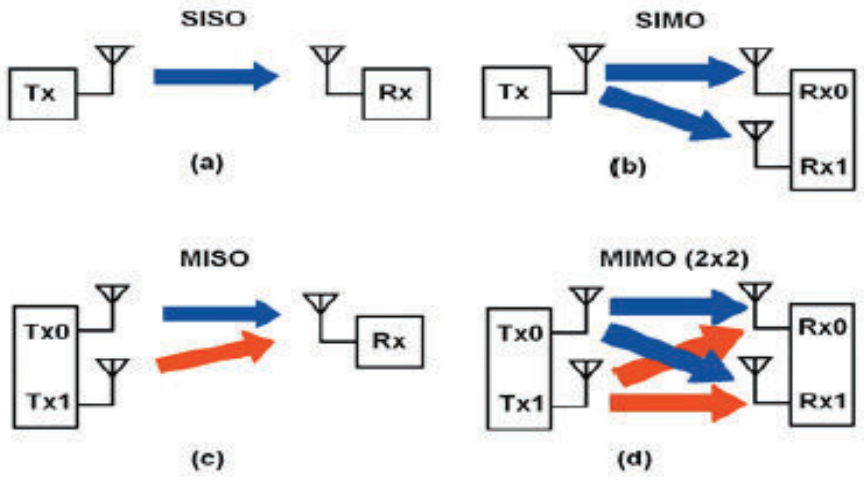

Figura 1.14 Diversidad de antenas.

1.6 REVISIÓN DE LA CAPA FÍSICA DE LTE-A [1]

LTE especifica los protocolos de datos utilizados en el enlace ascendente y en el enlace descendente. En la nomenclatura 3GPP (Third Generation Partnership Project), eNodeB (enhanced Node Base station) se refiere a la estación base y el terminal móvil es denominado como UE (User Equipment).

1.6.1 INTERFACE AIRE [1]

La interface aire de LTE se basa en la tecnología de OFDM, en el enlace descendente utiliza la tecnología de acceso múltiple OFDMA y mientras que en el enlace ascendente se utiliza SC-FDMA.

OFDM provee una alta eficiencia espectral y transmisión de datos de banda ancha adaptable, resistencia a la interferencia inter símbolo causada por múltiples trayectorias, soporte para esquemas MIMO y soporte para técnicas de dominio de frecuencia.

La representación tiempo-frecuencia de OFDM provee altos niveles de flexibilidad en espectro y tiempo de transmisión de tramas. La flexibilidad en espectro no solo permite variedad en frecuencia de operación sino también escalabilidad en ancho de banda. LTE usa tramas cortas de 10ms con el objetivo de disminuir la latencia. Con el uso de tramas cortas, LTE permite mejorar la estimación del canal que establecerá el móvil, permitiendo evaluaciones oportunas y necesarias para adaptaciones realizadas por la estación base en el enlace descendente.

En el dominio del tiempo los recursos físicos del sistema LTE son estructurados conforme dos tipos de tramas; tipo 1 y tipo 2. La más importante para la LTE es la trama tipo 1 ya que es la que utiliza el modo FDD[37], y la trama tipo 2 utiliza el modo TDD[38].

1.6.2 FRECUENCIAS DE OPERACIÓN [1]

Uno de los objetivos de los estándares LTE es brindar compatibilidad con los estándares previos, por lo que el estándar LTE tiene disponibles las bandas definidas en estándares 3GPP anteriores.

Cada operador puede desplegar su red LTE en cualquiera de las frecuencias disponibles dependiendo de las políticas de cada país. A continuación, se muestran las frecuencias añadidas en el *release* 8 de LTE:

- Banda de 450 -470 MHz|
- Banda de 790 - 806 MHz
- Banda de 2300 - 2400 MHz
- Banda de 790MHz - 862 MHz para ITU región 1 (Europa, Medio Oriente y África) e ITU región 3 (todos los otros países de Asia y el Pacífico).
- Banda de 698 - 806 MHz para ITU región 2 (Norte y Sur de América) e ITU región 3 (9 países incluyendo Japón, China e India).
- Banda de 3400 - 3600 MHz para ITU región 1 (en 82 países), ITU región 2 (América en 14 países excepto L/S/Canadá) e ITU región 3.

[37] FDD: Se refiere a una comunicación bidireccional en la misma banda de frecuencia, pero en distintos periodos de tiempo uno para el enlace ascendente y otro para el enlace descendente.
[38] TDD: Consiste en asignar una banda de frecuencia para la transmisión de información por el enlace ascendente y otra para el enlace descendente.

LTE soporta los modos FDD y TDD. En FDD se tienen un par de bandas de frecuencia que permiten transmisión simultánea, se utiliza una banda para el enlace descendente y una para el enlace ascendente. En TDD en cambio se utiliza la misma banda de frecuencia y enlace para transmisiones ascendentes y descendentes, las transmisiones son multiplexadas en el tiempo, es decir se asignan períodos de trasmisión para el enlace ascendente y períodos de tiempo para el enlace descendente.

1.6.3 PRB - PHYSICAL RESOURCE BLOCK [10]

El bloque de recursos físicos es el mínimo elemento de información que el eNB puede asignar a un terminal de usuario. Un PRB ocupa 180 KHz de ancho de banda, que equivalen a doce sub-portadoras espaciadas 15 KHz entre ellas, en un PRB se transmiten 6 ó 7 símbolos OFDMA, esto depende del prefijo cíclico utilizado (4.7ms y 16.67ms respectivamente). La duración de un PRB, duración de un slot o ranura temporal es igual a 0.5 ms, como se observa en la Figura 1.15.

Como se explicó anteriormente en cada PRB se dispone de 7 símbolos con 12 sub portadoras asociadas, se tienen en total 84 recursos disponibles en donde ubicar los símbolos QPSk, 16QAM o 64QAM. En el caso de usar la modulación de mayor eficiencia espectral (64 QAM), en la cual se transmiten 6 bits/símbolo, es posible que un PRB transmita hasta 504 bits, incluido datos codificados de usuario, canales de control y señalización de capa física, cada 0.5 ms, lo que da como resultado que la velocidad neta de transmisión pico sea de aproximadamente 1Mbps.

El número de bloques de recursos físicos disponible en la red se encuentra relacionada con la canalización, tal y como se muestra en la Tabla 1.4.

Ancho de banda	# PRB
1.4MHz	6
3MHz	15
5MHz	25
10MHz	50
15MHz	75
20MHz	100

Tabla 1.4 PRBs disponibles por ancho de banda

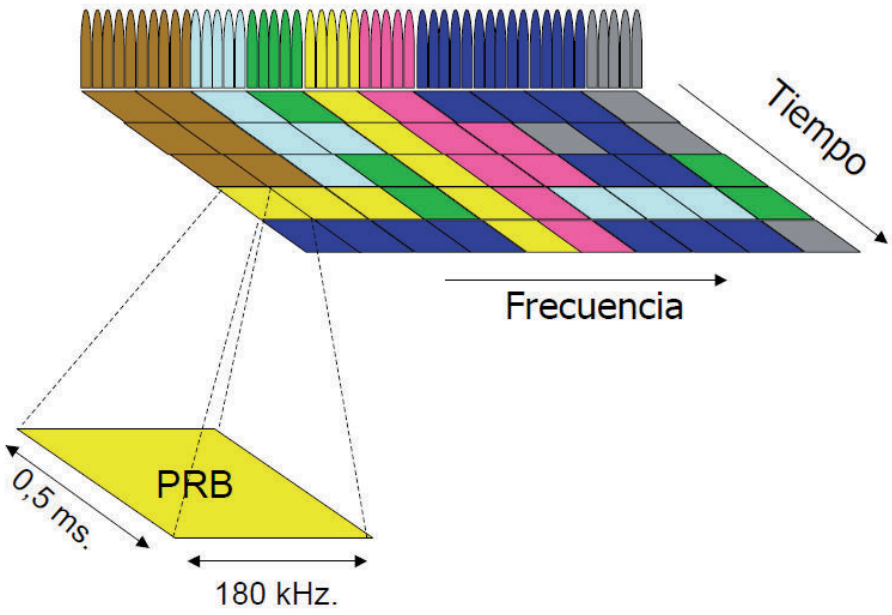

Figura 1.15 Bloque de Recurso Físico (PRB) [10]

El número de bloques de recursos físicos disponible en la red se encuentra relacionada con la canalización, tal y como se muestra en la Tabla 1.4.

Ancho de banda	# PRB
1.4MHz	6
3MHz	15
5MHz	25
10MHz	50
15MHz	75
20MHz	100

Tabla 1.4 PRBs disponibles por ancho de banda

Por lo tanto, considerando el número de PRB por el ancho de banda se tienen los valores presentados en la Tabla 1.5, A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo:

Por cada PRB se tienen 7 símbolos con 12 subportadoras:

$$7 * 12 = 84\ simbolos$$

Se obtienen 84 símbolos OFDM, si se usa la modulación 64QAM se pueden transmitir 6 bits/símbolo.

$$84\ simbolos * 6\ \frac{bits}{simbolo} = 504\ bits$$

Entonces en cada PRB se transmitirán 504 bits; como cada PRB dura 0.5 ms la velocidad aproximada es 1Mbps, siendo ésta la velocidad pico teórica para un PRB.

$$\frac{504\ bits}{0.5\ ms} = 1008\ Kbps$$

A continuación, se realiza el cálculo de la velocidad pico neta por usuario, para lo cual se toma como ejemplo de cálculo un ancho de banda de 1.4 MHz con el cual se disponen de 6 PRBs lo que teóricamente da como resultado una velocidad máxima de 6 Mbps. Si se considera que los bits de control son aproximadamente el 15% de los bits, entonces cada PRB contiene 428 bits de información.

$$\frac{428\ bits}{0.5\ ms} = 856.8\ Kbps$$

A continuación se obtiene la velocidad total pico, para el presente ejemplo de cálculo con un ancho de banda de 1.4 MHz se tiene 6 PRB, tal como se mostró en la Tabla 1.4,

$$856.8\ Kbps * 6 = 5.14\ Mbps$$

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz.
Velocidad Pico Total (Mb/s)	6	15	25	50	75	100
Velocidad pico neta por usuario (Mb/s) (menos el 15% de los recursos destinados a control y señalización)	5,1	12,8	21	42,5	63,7	85

Tabla 1.5 Velocidades pico teóricas en función de la canalización [10]

Los valores indicados de velocidad pico total incluye, los datos de usuario y datos de control y señalización. Las velocidades obtenidas anteriormente no consideran un sistema con multiplexación espacial,

Considerando un sistema MIMO 2x2 se estima aproximadamente obtener el doble de la velocidad neta. Cabe aclarar que los cálculos realizados anteriormente son una estimación de las capacidades de la red de acceso.

Las velocidades que un usuario alcanza en la práctica dependen de varios factores como por ejemplo la calidad del canal de radio, usuarios simultáneos en la celda, el tipo de tecnología instalada por el operador de telefonía celular, el tipo de servicio y la calidad de servicio asociada, la calidad del terminal de usuario, entre otros parámetros.

1.6.4 ENLACE DESCENDENTE

En el enlace descendente se requieren señales físicas que permitan al terminal móvil sincronizarse al sistema y demodular coherentemente las señales OFDMA transmitidas. Además de procedimientos físicos (canales físicos) que son usados para el transporte de la información destinada a los usuarios situados en la zona de cobertura del eNB y mecanismos de señalización y control que permitan una transmisión eficiente y controlada de la información.

1.6.4.1 Señales físicas [7]

Para facilitar la implementación de mecanismos físicos primordiales para efectuar modulación/demodulación de las señales OFDMA propias del enlace descendente del sistema LTE, se tiene un conjunto de señales de referencia y sincronización temporal.

1.6.4.1.1 Señales de referencia (RS)

La señal de referencia o piloto es usada para obtener medidas de la calidad en el enlace descendente, estimación de la respuesta impulsional del canal para efectuar una demodulación/detección coherente e implementación de mecanismos de búsqueda de celda y sincronización inicial.

Esta señal se ubica en determinados recursos elementales (una subportadora y un símbolo) y un espaciamiento de frecuencia de seis subportadoras. Como mínimo es necesario dos señales de referencia por cada PRB conocidas como señales de referencia primarias (RSP), y se ubican en el primer símbolo de una ranura temporal (TS).

Dependiendo de las condiciones del canal de radio se puede ubicar un segundo grupo de señales de referencia, conocidas como señales de referencia secundarias (RSS - Reference Secondary Signal), habitualmente ubicadas en el quinto símbolo de la ranura temporal. En la Figura 1.16 se muestra un ejemplo de la ubicación de RSP y RSS.

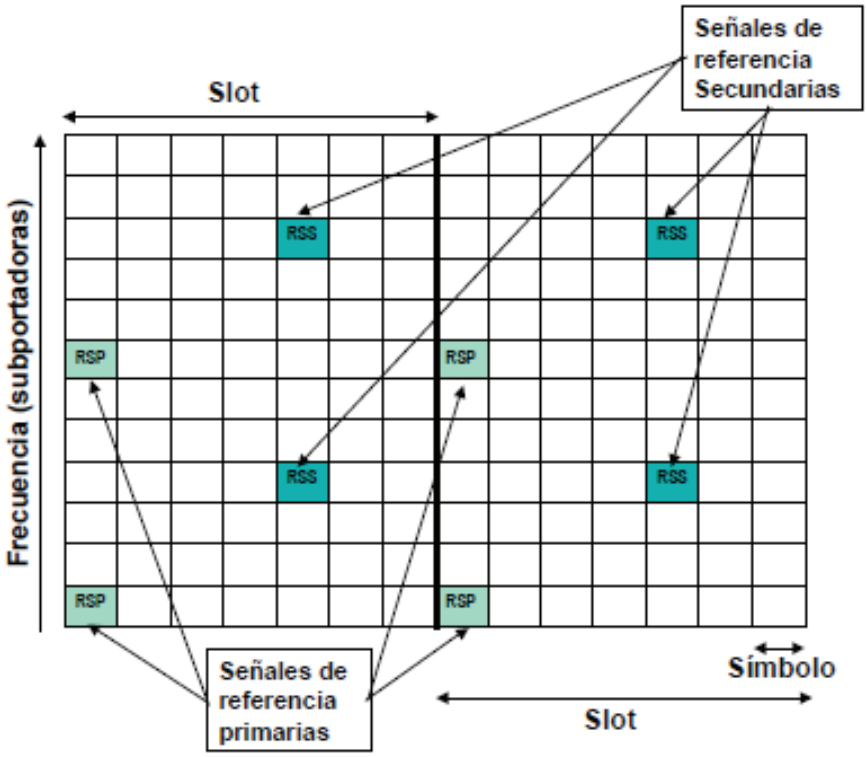

Figura 1.16 Ubicación de señales de referencia primarias y secundarias [10]

Para el caso de múltiples antenas en el transmisor cada antena posee su patrón de señales piloto.

1.6.4.1.2 Señal de Sincronización (SCH)

La señal de sincronización es usada para facilitar procesos de sincronización temporal (principalmente a nivel de trama y sub trama) del sistema, esta señal se encuentra conformada por:

- P-SCH (Primary SCH): Posibilita la sincronización temporal a nivel de subtrama, mediante comparación de la señal recibida y una secuencia de referencia almacenada en el receptor.

- S-SCH (Secondary SCH): Permite la sincronización temporal a nivel de trama usando la comparación de señales recibida y propia.

1.6.4.2 Canales físicos [10]

El sistema LTE no implementa el uso de canales de tráfico dedicados, por el contrario, estos son compartidos. Esto quiere decir solo se establecen cuando un terminal móvil tiene datos destinados al usuario. Se puede implementar enlaces punto a punto entre el terminal móvil y la red; o punto multipunto entre la red y varios usuarios, es decir realizando una conexión multicast[39].

Para una transmisión eficiente de datos a través de la interfaz aire, se requiere canales físicos de control. Estos canales transportan señales de control originadas a nivel de capa física u originadas en capas superiores.

1.6.4.2.1 Canales físicos de tráfico

Los canales físicos de tráfico se clasifican en:

DOWNSTREAM

- **Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)**: Contiene información de usuario. Transporta la información entregada por la capa MAC mediante el canal de transporte Downlink Shared Channel (DL-SCH). No es un canal dedicado, se asigna a un usuario cuando tiene información que recibir. Transmite información de control tanto dedicada como común, por ejemplo, mensajes de *paging*[40] y de ciertos parámetros de radio difusión.
- **Physical Multicast Channel (PMCH):** Se utiliza para transportar información multimedia MBMS (Multimedia Broadcast and Multicast System) destinada a usuarios unicast[41] en redes de frecuencia única (SFN - *Single Frequency Network*).

UPSTREAM

[39] Multicast: Es una comunicación en la que se envía información hacia un grupo de usuarios de manera simultánea.
[40] Paging: Es un procedimiento que se usa para despertar a un equipo de usuario UE que se encuentra inactivo.
[41] Unicast: Es una comunicación en la que participan un emisor y tiene como destinatario un único receptor.

- **Physical Uplink Shared Channel (PUSCH):** Es el canal usado para el envío de información de usuario. Se transmite con señales SC-FDMA en una o varias subtramas, el número de recursos de radio lo determina el gestor de recursos de radio.

1.6.4.2.2 Canales físicos de control

Los canales físicos de control se describen a continuación:

DOWNSTREAM

- **Physical Broadcast Channel (PBCH)**: Se utiliza para el transporte de información de radio difusión básica de la red, usada para la conexión inicial del terminal móvil con la red.
- **Physical Downlink Control Channel (PDCCH):** Es un canal de control genérico en el enlace descendente que informa de recursos asignados al PDSCH.
- **Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH):** Su función básica es la de proveer información al UE sobre la cantidad de símbolos reservados para enviar información de control a través del PDCCH y cuantos símbolos reservados para enviar información dedicada por medio del PDSCH.
- **Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH):** Es usado para transmitir confirmaciones (ACK/NACK) de las transmisiones realizadas en el enlace ascendente.

UPSTREAM

- **Physical Uplink Shared Channel (PUSCH):** Transmite información perteneciente al usuario e información de control dedicada enviada de capas superiores.
- **Physical Uplink Control Channel (PUCCH):** Es utilizado para transmitir información de control del enlace ascendente. Por ejemplo, transmisión de peticiones de asignación de recursos, confirmaciones (ACK/NACK), e información de la calidad del canal (CQI- Channel Quality Indicator,).
- **Physical Random Access Channel (PRACH):** Se utiliza para enviar los mensajes de acceso aleatorio. Estos mensajes constituyen la transmisión

inicial que realiza el UE cuando tiene información para enviar a la red, para lo que requiere sincronizar el enlace de UL mediante el proceso de acceso aleatorio.

1.6.5 AGREGACIÓN DE PORTADORA [15] [16]

LTE Advanced requiere de un ancho de banda de 100 MHz para operar como tecnología de cuarta generación, actualmente ningún operador de telefonía celular en el país tiene asignado tal cantidad de ancho de banda. Lo que actualmente se tiene es la designación de bloques de frecuencia en ciertas bandas, es por eso que se implementa la agregación de portadora técnica que permite usar eficientemente el espectro fragmentado que disponen los operadores de telefonía celular.

La agregación de portadora está diseñada para soportar la agregación de una variedad de arreglos de componentes de portadora[42] (CC, *Carrier Component*), como se muestra en la Figura 1.17, los componentes de portadora pueden tener un mismo valor de ancho de banda o diferente, pueden ser adyacentes o no adyacentes, pueden estar en la misma banda de frecuencia o en diferentes bandas de frecuencia, tanto en el enlace ascendente como descendente.

En la Figura 1.18 se muestran las alternativas que brinda la agregación de portadora en la tecnología LTE - A. Las alternativas son:

a) Componentes de portadora contiguas y en la misma banda de frecuencia, conocida como intra-band contigua.

b) Componentes de frecuencia en la misma banda de frecuencia, pero no contiguas intra-band no contigua.

c) Componentes de portadora asignadas en diferentes bandas de frecuencia.

[42] Componentes de portadora: Es una portadora OFDM normalmente usada en LTE, la cual se encuentra compuesta por subportadoras.

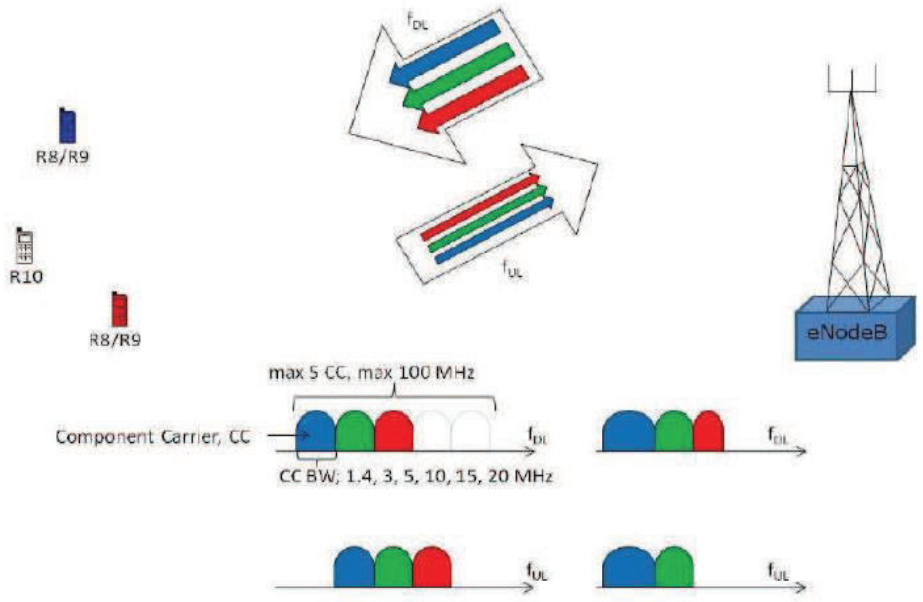

Figura 1.17 Agregación de portadora [16]

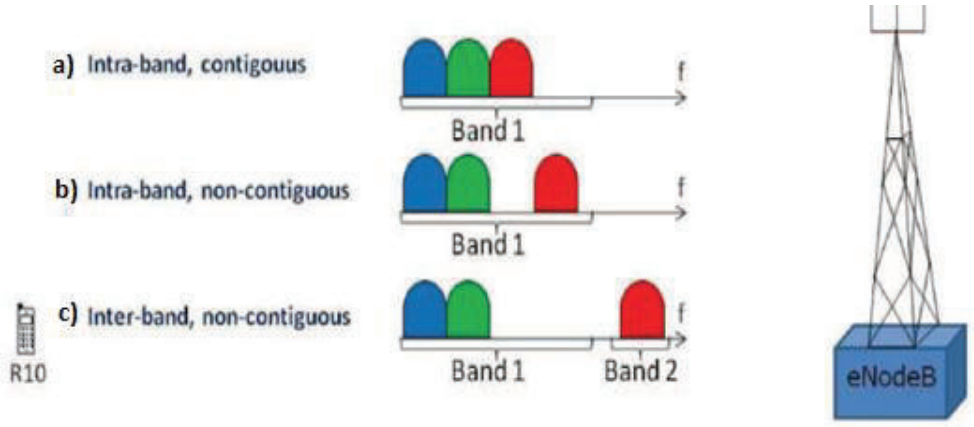

Figura 1.18 Alternativas de la agregación de portadora [16]

La agregación de portadora permite el soporte de redes heterogéneas, lo que involucra el uso de macro celdas de alta potencia y celdas de menor tamaño y potencia. Permitiendo que el UE pueda tener acceso a recursos de varias celdas. El UE se conecta a una celda de servicios primaria y hasta cuatro celdas secundarias. La celda primaria es configurada durante el establecimiento de la conexión. En tanto que la celda de servicios secundaria puede ser configurada después de la conexión establecida con la celda primaria.

La celda de servicios primaria establece una conexión RRC (*Radio Resource Control*), con lo que se puede gestionar todas las componentes de portadora asignadas a un determinado UE.

1.6.6 PROTOCOLOS [10]

Los protocolos se estructuran de acuerdo a los planos utilizados en LTE. En el plano de control se encuentran todos los protocolos que permiten la administración de las entidades de red y en el plano de usuario todos los protocolos que permiten el envío de tráfico IP.

1.6.6.1 Protocolos de la interfaz de radio [10]

El envío de paquetes IP entre el equipo de usuario y el eNB es realizado usando una pila de protocolos de dos capas, capa enlace y capa física, como se aprecia en la Figura 1.19. La capa enlace a su vez es dividida en tres subcapas: Packet Data Convergence Protocol (PDCP), Radio Link Control (RLC) y Medium Access Control (MAC). Cada capa y subcapa cumple con una función en específico para lo cual añade una cabecera y una cola.

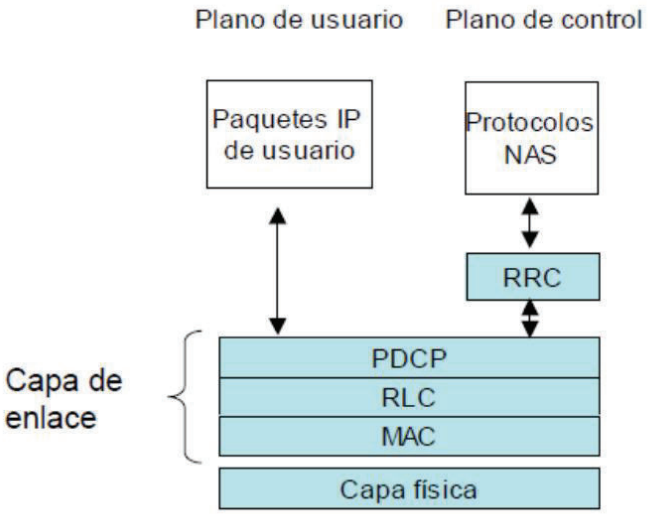

Figura 1.19 Protocolos Capa enlace [6]

Para enviar paquetes IP entre el equipo de usuario y el eNB a través la interfaz de radio se usa una pila de protocolos conformado por una capa de enlace y una capa física.

De acuerdo a la Figura 1.19, los protocolos NAS (*Non-Access Stratum*) son los protocolos de más alto nivel del plano de control en la interfaz de radio entre el UE y la MME. Las principales funciones que cumplen dichos protocolos son el soporte de la movilidad correspondiente al equipo de usuario (UE) y apoyo a procedimientos de gestión de sesiones IP, el establecimiento y mantenimiento de la conectividad entre el equipo de usuario y actuar como la puerta de enlace de la red (P-GW).

La PDCP es la encargada de proporcionar punto de acceso al servicio portador de radio RB (Radio Bearer[43]). Es decir que los paquetes IP se envían y reciben a través del servicio que brinda la capa PDCP, la principal característica es la compresión de la cabecera IP y el cifrado de la información garantizando así la confidencialidad e integridad de la información. El header PDCP contiene un número de secuencia para identificar los paquetes y para proveer una entrega ordenada de los mismos en recepción, además permite identificar paquetes duplicados.

La RLC proporciona un envío fiable de los paquetes PDCP entre el equipo del usuario y el eNB. Esta subcapa soporta funciones de corrección de errores con mecanismos de ARQ (Automatic Repeat Request), concatenación, segmentación y re-ensamblado, entrega ordenada a subcapas superiores, detección de duplicados y detección-recuperación de errores en el protocolo.

La MAC es la subcapa encargada del control al acceso al medio físico por lo que soporta funciones de *scheduling* dinámico[44]. Entre los equipos, considerando prioridades, multiplexa paquetes RLC de varios servicios portadores de radio en los canales disponibles en la capa física, además de la utilización de control de errores con un ARQ híbrido. Los servicios que presta la subcapa MAC a la subcapa RLC son canales lógicos, por cada canal lógico existe una única entidad MAC.

---

[43] Portador de radio: Es un enlace el cual se define por un cierto conjunto de características, lo que permite brindar calidad de servicio.

[44] Scheduling dinámico: es un método el cual permite la redistribución de procesos, transfiriendo tareas desde procesadores de alta carga a procesadores con menor carga, esto es balanceo de carga.

La capa física es la encargada de la transmisión a través del canal de radio. Tiene funciones como codificación del canal, modulación, procesamiento de señales recibidas a través de múltiples antenas (MIMO) y administración de recursos físicos tiempo-frecuencia.

La RRC permite el establecimiento de una conexión de control entre el eNB y un equipo de usuario, a través de la cual se llevarán a cabo funciones de gestión operativa de la interfaz de radio. Entre la cuales se destaca la gestión de los servicios portadores de radio, soporte de funciones de movilidad, difusión de parámetros de la red y avisos (para establecer llamadas entrantes o recepción de mensajes) a terminales que no tienen una conexión establecida, a través del canal de *paging*. El servicio que ofrece la subcapa PDCP a la capa RRC es conocido como servicio portador de señalización (SRB- *Signalling Radio Bearer*).

1.6.7 PROCEDIMIENTOS ASOCIADOS A LA INTERFAZ AIRE [7]

1.6.7.1 Sincronización y adquisición inicial de parámetros

La primera acción que ejecuta un terminal móvil LTE después de su activación es la búsqueda de una celda a la cual conectarse, dicho procedimiento busca:

- Sincronización en tiempo y frecuencia a nivel de capa física del equipo de usuario con el transceptor que se encuentra en el eNB de la celda a la que el usuario pretende conectarse.
- Obtener sincronización temporal a nivel de trama y subtrama.
- Obtener la identidad de la celda a la cual se procederá a asociarse.

El procedimiento de selección de la celda se basa en la utilización de señales de sincronización primaria y secundaria, En la Figura 1.20 se muestran las señales y canales físicos asociados al procedimiento de sincronización y adquisición de parámetros.

Figura 1.20 Sincronización y adquisición inicial de parámetros [10]

A partir de la señal primaria de sincronización (P-SCH), transmitida a través de las 62 sub portadoras centrales y el proceso de sincronización, se detecta la ubicación temporal de la misma. Para el caso de operación en modo FDD esta señal de sincronización primaria es transmitida en el último símbolo OFDMA de la primera y undécima ranura temporal (TS) en cada trama, dando al terminal móvil los límites a nivel de ranura temporal. De forma similar, para el caso de operación en modo TDD las señales de sincronización se transmiten en el tercer símbolo de las ranuras temporales tercera y décimotercera.

El terminal móvil además de la detección del canal de sincronización se encarga de realizar las siguientes funciones:

- Compensación de *offsets* de frecuencia introducidos en la señal recibida por los transmisores y receptores, y ajuste de la frecuencia central de radio canal.
- Obtención del sincronismo a nivel de símbolo.

La señal S-SCH permite la detección de una de las 168 posibles secuencias que indican la identidad de la celda. A partir de la detección del canal de sincronización secundaria S-SCH se realizan las siguientes funciones:

- Detección del límite de la trama. Para lo cual se considera que la señal S-SCH es transmitida en el penúltimo símbolo de las ranuras temporales numeradas como 0 y 10 que corresponden a la primera y sexta subtrama. Una vez detectada la secuencia de 62 bits asociada a la señal de sincronización secundaria, inmediatamente se sabe en qué ranura

temporal se detectó dicha secuencia de sincronización secundaria y por consiguiente la ubicación de la señal S-SCH respecto al inicio de la trama.

- Detección del identificativo de grupo de celda (Cell ID).

Con las señales de referencia o señales piloto adquiridas, el terminal móvil estima la respuesta impulsional del canal relacionado al ancho de banda total ocupado por el canal de radio y de ser necesario se obtiene la sincronización a nivel de bit. Las señales de referencia y respuesta impulsional del canal son necesarias para la correcta demodulación del canal de radio difusión o broadcast (PBCH) además de los canales de tráfico y señalización del sistema.

A partir del canal de radio difusión (PBCH), el terminal móvil adquiere la información de la red a la que pretende conectarse, información usada para el correcto funcionamiento del mismo. El terminal móvil recibe a través del canal de radio difusión (PBCH), el *Master Information Block* que contiene información acerca de la canalización disponible (4 bits), información de la configuración del canal PHICH (3 bits) y 7 bits para la numeración de trama (SFN-*System Frame Number*).

El resto de información sobre características e identificación del sistema los recibe a través de los *System Information Block* (SIB) transmitidos a través del *Physical Dowlink Shared Channel* (PDSCH). La existencia de los SIBs en los PDSCH se indica a través del canal de control PDCCH.

El *System Information Block* de mayor importancia es el primero (SIB #1) que contiene información sobre el operador e identidad de la celda, código del área de localización, nivel de recepción mínimo requerido, etc. Cuando se opera en modo TDD se incluye además información de ubicación de subtramas y configuración de la subtrama.

1.6.7.2 Mecanismos de acceso aleatorio

El acceso aleatorio es el procedimiento mediante el cual un terminal móvil se conecta a un eNB en particular. Este procedimiento se efectúa cuando:

- El terminal móvil pretende conectarse a la red.
- Cuando el terminal móvil efectúa procedimientos de *handover*.
- Cuando se efectúa procedimientos de reelección de celda

- Cuando el terminal móvil tiene una llamada entrante, etc.

El sistema LTE define dos tipos de procedimientos de acceso a la red: Acceso por contienda y Acceso regulado.

1.6.7.2.1 Acceso por contienda

Para el acceso por contienda primero se envía un preámbulo de acceso PRACH usando bloques de acceso como se muestra en la Figura 1.21. La secuencia del preámbulo es seleccionada de forma aleatoria entre un grupo de 64 posibles secuencias, el nivel de potencia con el que el móvil envía el preámbulo es determinado a partir de la estimación de pérdidas de propagación en el enlace, usando para esto señales de referencia[45] enviadas en el enlace descendente. Si el terminal móvil no recibe respuesta del eNB en un tiempo determinado el terminal móvil repite la transmisión incrementando en nivel de potencia, este mecanismo es conocido como *Power Ramping*.

En el caso de que los terminales móviles seleccionen secuencias de preámbulo distintas, no existe problema debido a la ortogonalidad de las secuencias de preámbulo. En el caso de que los terminales móviles seleccionen el mismo preámbulo, inicialmente no resulta un problema, debido a que el eNB entendería la llegada del mismo preámbulo recibido de diferentes caminos de propagación.

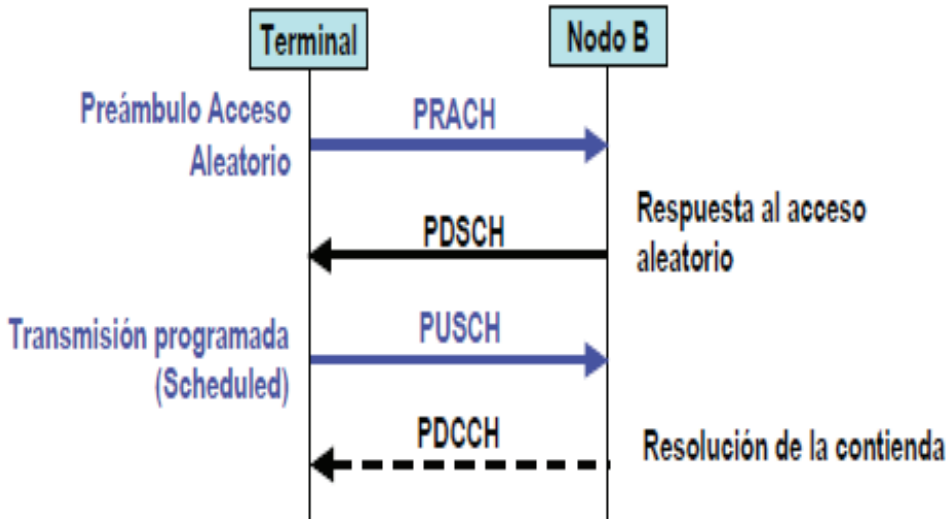

Figura 1.21 Acceso por contienda [10]

[45] Señales de referencia: Señales enviadas por el eNB al UE para procesos de sincronización y *Power Ramping*

La respuesta a la solicitud de acceso aleatorio contiene el preámbulo usado por el terminal móvil por duplicado, información para el alineamiento temporal (*time advance*) de las consecuentes transmisiones, una asignación temporal inicial y una asignación inicial de recursos del enlace ascendente.

Posteriormente, el eNB recibe información, mediante el paquete PUSCH[46], sobre la información de la identidad del terminal móvil y permite que el móvil solicite información del área de seguimiento o una solicitud de conexión a nivel de RRC.

En el caso de que el terminal móvil seleccione el mismo preámbulo y el eNB no diferencie a los dos terminales, el eNB enviará un único mensaje de respuesta, los terminales móviles entenderán que tienen recursos reservados para transmitir y por lo tanto se producirán colisiones entre los mensajes enviados por los terminales, en esta situación pueden darse dos casos:

- En el primer caso el eNB no comprenderá las transmisiones debido a las colisiones, por lo que después de un número de intentos predeterminados por parte de los terminales de usuario, si respuesta de confirmación positiva, los terminales móviles procederán a reiniciar el procedimiento de acceso.
- En el caso de que el eNB entienda las transmisiones de los terminales móviles, éste por consiguiente enviará un acuse de recibo, a todos los terminales móviles y si los usuarios conocen la existencia de una colisión en el envió de sus mensajes procederán a reiniciar el procedimiento de acceso.

1.6.7.2.2 Acceso regulado

El procedimiento del acceso regulado es similar al acceso por contención, salvo que en este caso no existe la posibilidad de colisión, esto gracias a que el terminal usa un preámbulo de acceso asignado por el eNB previamente. El procedimiento a seguir es el que se detalla en la Figura 1.22.

El procedimiento para el acceso regulado lo inicia el eNB el mismo que asigna la secuencia de preámbulo de acceso, luego el terminal móvil envía un paquete de

[46] PUSCH: Es un canal del enlace ascendente que lleva tanto datos de usuario como datos de señal de control.

acceso PRACH, de forma similar al procedimiento de acceso por contención, posteriormente el eNB envía la respuesta respectiva a la petición de acceso.

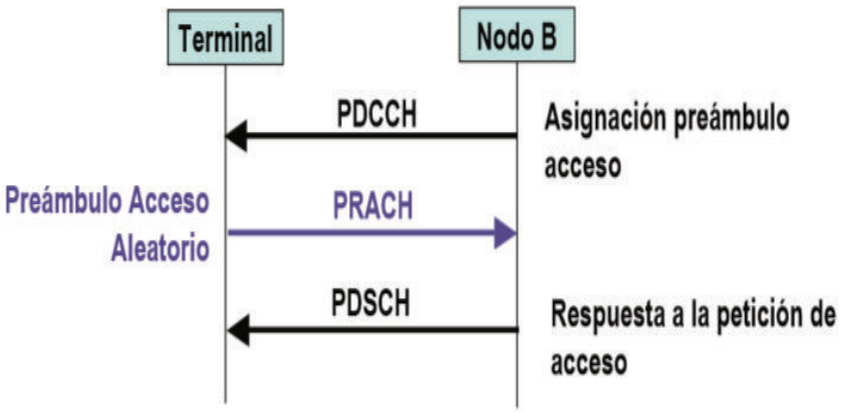

Figura 1.22 Acceso regulado [10]

1.6.7.3 Mecanismos de notificación (*Paging*)

El principal objetivo de estos mecanismos es establecer una comunicación con dispositivos en modo IDLE e informar a los terminales activos los cambios ocurridos en el sistema de información o de notificaciones de emergencia ubicados en los Bloques de Información de Sistema (SIB – *System Information Block*) número 10 o número 11.

Cuando el terminal se encuentra en modo IDLE, es necesario que el mismo se despierte periódicamente para verificar la información enviada a través del canal de control y obtener información acerca de la información de notificación en los recursos físicos del canal PDSCH. Para lo cual el terminal almacena un valor por defecto conocido como ***paging cycle***, es decir de periodicidad de la notificación y del número de grupo de notificaciones, dichos valores se transmiten en a través del canal de radio difusión (BCCH), con lo que se calcula el período durante el cual el terminal debe despertarse y acceder a la información de notificación o *paging.*

1.6.7.4 Mecanismos de obtención del servicio portador de radio

Antes de poder enviar información entre el terminal móvil y el eNB es necesario establecer un servicio portador de radio, tanto para señalización (Servicio

Portador de Radio de Señalización o SRBs) como para los datos de usuario (Servicio Portador de Radio de datos o DRBs).

El establecimiento de una conexión a nivel de capa RRC implica que se debe establecer un servicio portador de señalización tipo SRB1 (destinado a intercambio de mensajes del protocolo RRC y los protocolos NAS) y envío de mensajes hacia el NAS solicitando el establecimiento de una conexión por medio de la interfaz S1 que comunica al eNB con el gestor de movilidad MME.

Luego del establecimiento de la conexión se procede a la activación de mecanismos de seguridad y el establecimiento de un segundo servicio portador de radio de señalización (SRB2) y uno o varios servicios portadores de datos (DRB). En la Figura 1.20 se muestra el procedimiento de establecimiento de conexión y portadores de radio.

En la Figura 1.23 se observa que la secuencia de mensajes para el establecimiento de una conexión comienza con una respuesta a un mensaje de notificación o *paging* enviado por la red (eNB). Luego el terminal móvil inicia un procedimiento de acceso por contienda, para luego realizar el envío de un mensaje RRC (con una solicitud de conexión) que contiene además de la propia solicitud información del identificador temporal del terminal móvil (S-TMSI) un número aleatorio.

En el mensaje de solicitud de conexión se puede únicamente identificar cinco causas para el establecimiento de la conexión, como son; emergencia, acceso prioritario, acceso finalizado en el terminal móvil, señalización procedente del móvil y transmisión de datos del terminal móvil.

Cuando el eNB acepta la solicitud de conexión envía como respuesta un mensaje RRC (*Connection Setup*) que contiene información de configuración inicial para la portadora de radio SRB1. El terminal móvil como respuesta envía un mensaje RRC (Connection Setup Completed), y además envía un mensaje al NAS un identificador del nodo MME al que está asociado y el identificador del operador móvil.

En este punto el terminal móvil ha pasado de estado IDLE a conectado, ahora debe establecer mecanismos de seguridad y establecer servicios portadores de

radio asignados por la red. Para lo cual el eNB inicia con el envío de un mensaje de activación del modo de seguridad (*Security Mode Command*) en el que se solicita la activación del cifrado para la protección de la integridad de los mensajes, luego el terminal móvil envía un mensaje de respuesta (*Security Mode Completed*).

Luego la red procede a enviar una petición de reconfiguración de conexión RRC (*Connection Reconfiguration*) con los parámetros de configuración que permiten establecer un segundo servicio portador de radio de señalización (SRB2) y uno o varios servicios portadores de radio para datos (DRB), una vez establecida la reconfiguración el móvil precede a responder con un mensaje RRC (Connection Reconfiguration Complete).

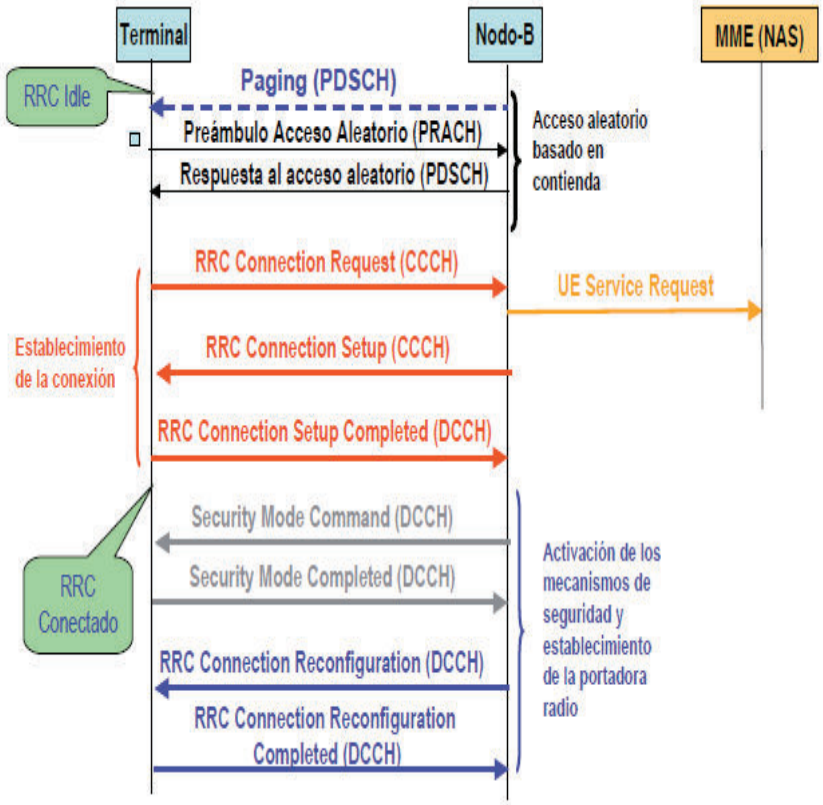

Figura 1.23 Secuencia de mensajes para establecimiento de conexión [10].

Una vez establecidos los servicios portadores de radio de señalización, se configura uno o varios servicios portadores de radio de datos (DRB), de forma similar a la descrita anteriormente, con la diferencia de que el eNB decide cómo se envían los paquetes de los servicios portadores EPS por la interfaz aire. Los

protocolos de capas inferiores se configuran para la transmisión de datos de usuario, y el protocolo PDCP aplica mecanismos de compresión de cabecera dependiendo del tipo de tráfico de usuario que será transportado.

La capa PDCP comprime las cabeceras del protocolo IP de los paquetes a ser enviados para aumentar la eficiencia de transmisión en la interfaz aire. De forma similar, el protocolo RLC se configura dependiendo del tipo de tráfico a transportarse, por ejemplo, para el caso de servicios tolerantes al retardo se implementan mecanismos de retransmisión, por otro lado, el eNB asigna prioridades a los flujos de datos en el enlace ascendente dependiendo de los recursos de radio disponibles.

1.6.7.5 Estado del canal (CQI-Reporting)

El terminal móvil se encarga de proporcionar a la red tres tipos de información: Indicador del estado del canal (CQI - *Channel Quality Indicator*), indicador de rango (RI – *Rank Indication*) e indicador de la matriz de pre codificación (PMI - *Precoding Matrix Indicators*).

El indicador CQI es el más importante y permite describir 16 posibles esquemas de modulación/codificación (MCS[47]). Por lo tanto, el CQI informa a la red (eNB) sobre los posibles parámetros a utilizar el en el proceso de configuración del enlace. El CQI permite informar al eNB sobre el MCS para garantizar una taza de error (Block Error Rate o BLER).

El indicador de rango (RI) se utiliza cuando el terminal móvil opera en modo MIMO, para indicar el número de capas a considerarse en el esquema de multiplexado espacial. El indicador RI puede tomar valores de 1 ó 2 cuando se usa una multiplexación espacial tipo 2x2, puede tomar valores de hasta 4 cuando se tiene multiplexación espacial tipo 4x4.

El indicador PMI informa al eNB cuál es la matriz de recodificación que se usará dependiendo del estado del canal. La cantidad de matrices de pre codificación depende del tipo de diversidad espacial utilizada, del valor de RI y de las características del terminal móvil. Por ejemplo, para el caso de un eNB con dos

[47] MCS: Modulation and Coding Schema, esquema de modulación y codificación a usarse dependiendo de las características del canal inalámbrico.

antenas se puede elegir entre 6 matrices de codificación, mientras que si trabaja con 4 antenas se puede elegir entre 64 posibilidades.

1.7 REVISIÓN DE TRABAJOS PREVIOS AFINES

En el tema relacionado a la calidad de servicio en redes celulares de segunda y tercera generación se han desarrollado varios trabajos tanto a nivel nacional como internacional, de estos trabajos se procederán a revisar dos trabajos, uno realizado en el Ecuador y uno internacional, seleccionando los trabajos que presentan mayor relación al presente estudio técnico.

De los trabajos más relevantes encontrados, se puede apreciar que en cada trabajo de manera general se realiza un estudio de la tecnología, previo a la evaluación de los parámetros que influyen en la calidad de servicio. De los trabajos seleccionados se revisará conceptos generales, estándares estudiados y metodología de medición empleada.

1.7.1 TESIS "ESTUDIO TECNICO PARA LA RECOMENDACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DE SERVICIO SMA SOBRE REDES MOVILES UMTS EN EL ECUADOR" [41]

Este proyecto fue realizado en el año 2010 en la ciudad de Sangolquí – Ecuador, con la finalidad de elaborar una propuesta que utilizará el Organismo Técnico de Control de las Telecomunicaciones en el Ecuador conocido como Superintendencia de Telecomunicaciones (SUPERTEL) como una guía de procedimientos para el control de los parámetros técnicos de calidad de servicio SMA en redes celulares UMTS de las operadoras que prestan estos servicios.

El estudio parte de una descripción preliminar de las características generales de los sistemas móviles de tercera generación (3G - UMTS) y los diferentes servicios y aplicaciones brindados a través de esta plataforma. Además, se efectúa una breve investigación de la situación regulatoria y de mercado actual de SMA en el Ecuador, con el objetivo de determinar los servicios a los cuales se evaluará los parámetros de calidad de servicio asociados.

Se define los parámetros de QoS en base a un estudio técnico de los estándares internacionales, como son: UIT-T E.802, ETSI EG 202 057-2, ETSI EG 202 057-

3, ETSI EG 202 057-4 y 3G TR 22.925, con lo cual se establecen valores objetivos que caracterizan a estos criterios de calidad, cuya recomendación final esta complementada con el análisis y comparación de los resultados generados por la mediciones efectuadas en ambiente real de las redes UMTS de las operadoras CONECEL SA y OTECEL SA, en base a un protocolo de pruebas previamente definidas, dicho protocolo consiste en detallar el procedimiento a efectuarse durante la ejecución de pruebas para evaluar área de cobertura, servicio de voz, SMS, MMS, video llamadas y datos en redes UMTS, utilizando los recursos (*hardware* y *software*) disponibles por la Intendencia Regional Norte (SUPERTEL), los valores objetivos prácticos obtenidos durante la realización del proyecto se presenta en la Tabla 1.6

Servicio/Prueba	Valores objetivo
Área de Cobertura	RSCP y Ec/Io
Servicios de SMS	Porcentaje de SMS con éxito y tiempo de entrega extremo a extremo de SMS
Servicio de MMS	Porcentaje de MMS enviados con éxito, tiempo de envío de un MMS, porcentaje de MMS recuperados con éxito, tiempo de recuperación de un MMS, porcentaje de notificación de un MMS con éxito, tiempo de notificación de un MMS, porcentaje de MMS con éxito y tiempo de entrega extremo a extremo de un MMS.
Servicios de Voz	Porcentaje de llamadas establecidas, tiempo de establecimiento de llamadas, porcentaje de llamadas caídas y calidad de la conexión de voz (MOS).
Servicio de Datos	Porcentaje de acceso de usuario con éxito, tiempo de acceso de usuario (log-in time), porcentaje de “PING’s” con éxito, retardo (tiempo de transmisión en un sentido), porcentaje de tareas “Transferencia de archivos” (FTP GET/PUT) con éxito, velocidad de transmisión de datos conseguida-Throughput (carga/descarga), porcentaje de tareas “Navegación Web” con éxito y tiempo de acceso a una página Web

Tabla 1.6 Valores objetivos prácticos obtenidos [41]

1.7.2 TESIS "ESTUDIO DE LA CALIDAD DE SERVICIO EN LAS REDES MÓVILES EN EL PERÚ" [42]

Este proyecto fue realizado en el año 2012, con la finalidad de realizar un estudio de la forma de administración de las normas de calidad de servicio en redes móviles (GSM y UMTS) en la ciudad de Lima - Perú y de los parámetros de medición utilizados para el control, los cuales fueron establecidos y son controlados por el OSIPTEL, que es el ente de control en Perú. En este proyecto adicionalmente se revisan planteamientos generales de la optimización de las redes móviles.

Primero se realiza una identificación y descripción de los problemas que abarca el servicio de telefonía celular, analizados desde el punto de vista tecnológico y desde la perspectiva del usuario.

Luego se presenta un marco teórico en el cual se recopila información acerca de las tecnologías que se encuentra presentes en el Perú; este enfoque se encuentra relacionado en cuanto al establecimiento de llamadas y factores internos y externos que intervienen para una comunicación exitosa. También se revisan las normas que definen los indicadores de calidad en el Perú. Algunas de las normativas son: Resolución N°040- 2005-CD/OSIPTEL (Reglamento de Calidad), Nº 143-2010-CD/OSIPTEL (Modificación de los procedimientos de supervisión de indicadores de calidad), N° 029 2009 CD/OSIPTEL (Procedimiento de supervisión de los indicadores de calidad), entre otros.

Se realiza una revisión global de la normativa de calidad de servicio, es decir, las recomendaciones establecidas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones, las cuales son: UIT-TE.800, E 450 - 2008 y la ETSI EG 202 057-3 V1.1.1 2005-04. El informe brinda indicadores de calidad que son presentados al ente regulador en Perú.

Por último, se realiza una comparación, a nivel de resultados obtenidos, entre operadores nacionales del Perú; y se realizan las recomendaciones necesarias para la mejora de los indicadores de calidad desde un enfoque de ingeniería y de marco regulatorio.

Los parámetros de QoS estudiados y analizados son: tasa de intentos no establecidos, tasa de llamadas interrumpidas, tiempo de entrega de mensajes de texto, cobertura radioeléctrica y calidad de la voz.

1.7.3 CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO DE PARÁMETROS TÉCNICOS DE QoS EN REDES 4G

En función a la informacion de los trabajos afines se pudieron extraer las siguientes consideraciones para el estudio de parámetros técnicos de QoS:

- Primero se realiza una revisión del estado actual de las normativas presentes y una revisión general de la tecnología que se analizará, identificando los parámetros de cobertura, servicio de voz, SMS, MMS, video llamadas y datos en redes UMTS que influyen en la QoS..
- Se establece un procedimiento para efectuar las mediciones, además se identifican los servicios que la tecnología en análisis brinda para en base a esto efectuar las pruebas.
- Se analiza la información recolectada y se elabora una recomendación dirigida al ente de control en este caso la ARCOTEL.

1.8 CALIDAD DE SERVICIO (QOS) [18] [19]

La QoS es la capacidad de las redes de datos y servicios de establecer, antes de la transmisión de los datos, las condiciones en las que se desarrollarán, es decir, la reserva de recursos para dicha transmisión.

Por lo tanto, la red debe brindar una calidad de servicio diferenciada al tipo de tráfico, asignando los recursos para suplir los parámetros de calidad que el tráfico requiera. Esto quiere decir ancho de banda asignado de forma diferenciada, implementación de políticas que eviten congestión en la red, asignación de prioridades al tráfico y modelado del tráfico en la red.

La QoS es la medida del comportamiento de la red frente a diferentes tipos de tráfico, Los mismo que requieren ciertas características, la red debe suplir estas características dependiendo de cada tipo de tráfico. Los parámetros involucrados con la calidad de servicio (QoS) principalmente son: Nivel de retardo o latencia,

ancho de banda, variación del retardo o jitter, rendimiento o *Throughput* y pérdida de paquetes.

1.8.1 Reserva de ancho de banda (Throughput)

Permite garantizar la transmisión de cierta cantidad de datos en un periodo de tiempo determinado. Esto es posible mediante el uso de identificadores de cabecera de los paquetes y permite además brindar prioridad a tráfico perteneciente a determinado tipo de archivos (video, voz, audio, etc.), realizando reservación del ancho de banda antes de realizar la transmisión de los mismos.

Este parámetro por lo general se expresa en unidades de paquetes, esto debido a que este parámetro de calidad de servicio debe ser aplicable a sistemas de datos en general.

1.8.2 Retardo (Delay)

Es el tiempo que se demora en transmitirse un bit desde el origen hasta el destino. El retardo puede ser afectado por la distancia, errores en la transmisión, capacidades de los equipos de transmisión entre otros factores.

1.8.3 Jitter

Es la variación en el retardo, producido por factores variables de la red como son: la diferente congestión experimentada y pérdida de sincronización o los diferentes caminos seguidos por los paquetes durante la transmisión. El Jitter puede ser remediado con el uso de buffers de mayor tamaño en los receptores no obstante esto incrementa el retardo extremo a extremo.

1.8.4 Pérdida de paquetes

Se refiere a los errores de los datos producidos durante la transmisión, debido a varios factores entre los cuales se encuentran: La congestión de la red, excesivos retardos, condiciones del medio de transmisión, entre otros. La pérdida de paquetes influye directamente con la calidad de servicio que experimenta el usuario final. Para disminuir los efectos de dichas pérdidas se

emplean diversas técnicas como el uso de técnicas FEC[48] con las cuales se incluye cierta redundancia a los datos. Otra técnica que puede ser utilizada es *interleaving* mismo que consiste en distribuir los datos en varios paquetes disminuyendo así los errores producidos durante la transmisión con lo que se disminuye su influencia.

1.8.5 NORMATIVAS TÉCNICAS RELACIONADAS CON CALIDAD DE SERVICIO.

En esta sección se realiza una breve revisión de las normativas más relevantes utilizadas con la calidad de servicio en redes de datos.

La normativa establecida por la ETSI es la ETSI EG 202 057 [40], la misma que se encuentra compuesta por cuatro documentos, las cuales se resumen a continuación:

- EG 202 057-1: Abarca las definiciones generales de parámetros de calidad de servicio y métodos de medida que involucran a los usuarios aptos para aplicar a cualquier servicio y métodos de medida relacionados con el usuario para servicios de voz, datos y fax disponibles a través de las redes de telecomunicaciones.
- EG 202 057-2: Abarca definiciones de calidad de servicio y métodos de medida relacionados a usuarios con acceso a servicios de voz, datos y SMS a través de redes de telecomunicaciones, con el uso de módems *V-9x.*
- EG 202 057-3: Abarca definiciones de calidad de servicio y métodos de medida relacionados con usuarios con acceso a servicios públicos, terrenales y móviles.
- EG 202 057-4: Abarca definiciones de calidad de servicio y métodos de medida relacionados con usuarios con acceso a servicios de Internet.

Recomendaciones establecidas por la UIT, establecen términos, definiciones modelos de servicio, objetivos de la calidad de servicio y recomendación, y

[48] FEC: Forward Error Correction, es un mecanismo de corrección que permite la corrección de información errónea en el receptor sin necesidad de retransmisión.

análisis de datos obtenidos en el funcionamiento de equipos de telecomunicaciones, estas recomendaciones se presentan a continuación:

- UIT E-800 y E809: Términos y definiciones relacionados con la calidad de servicios de telecomunicaciones.
- UIT E.810–E.844: Modelos usados en servicios de telecomunicaciones.
- UIT E.845–E.859: Objetivos que busca la implementación de la calidad de servicio y conceptos relacionados a los servicios de telecomunicaciones.
- UIT E.860–E.879: Uso de los objetivos de calidad de servicio para el diseño de redes de telecomunicaciones.
- UIT E.880–E.899: Recolección y análisis de datos obtenidos de la calidad de funcionamiento de equipos, redes y servicios.

1.8.6 CALIDAD DE SERVICIO EN REDES 2G Y 3G [15] [17]

La calidad de servicio es el grado de satisfacción que se produce con el cumplimiento de un conjunto de características, por lo que es fundamental considerar dichas caracteristicas en el diseño de las redes de telefonía móvil.

La calidad de servicio depende del punto de vista desde el cual se analice, esto es, desde el punto de vista de los usuarios y desde el punto de vista de la red. La calidad de servicio que perciben los usuarios se relaciona con las expectativas que tienen del servicio comparado con la calidad que perciben, en tanto que la calidad de servicio de la red se relaciona con la calidad que la red ofrece comparado con lo que la red entrega.

La calidad de servicio se encuentra compuesta por tres aspectos, los mismos que deben ser medidos y cumplidos para garantizar un adecuado servicio. Estos aspectos se presentan a continuación:

1.8.6.1 Accesibilidad a la red

La accesibilidad de la red se refiere a la disponibilidad de los recursos de red, que permiten a los usuarios el acceso a los servicios. La accesibilidad a la red se puede medir a través del parámetro de intensidad de campo eléctrico dentro del área de cobertura que proporciona el operador de red. Este parámetro varía dependiendo de la tecnología de red, para el caso de la tecnología de red 2G este parámetro se denomina RxLevel y para tecnologías 3G se denomina RSRP

(*Reference Signal Received Power*), estos parámetros se detallan a continuación.

- **Rx Level:** Es la intensidad de señal recibida por un teléfono móvil que se encuentra enganchado en una red celular, que depende de varios factores, algunos de los cuales son la distancia a la radio base, obstáculos tales como árboles, edificios, etc.
- **RSRP:** La potencia del código de señal recibida (RSRP) es la potencia media por un solo receptor en un canal físico de comunicaciones. Es usado como un indicador de la potencia que el usuario recibe de la estación base y comúnmente se expresa en dBm.

1.8.6.2 Accesibilidad de servicio

La accesibilidad al servicio se refiere a la disponibilidad de los servicios que ofrece la red y los parámetros que permiten su evaluación son: el tiempo promedio de espera (retardo), medido en segundos, desde que el usuario solicita el servicio hasta que tiene acceso al mismo. En el caso de telefonía este tiempo va desde que el usuario pulsa el botón de llamada hasta que escucha el tono de control de la llamada, el parámetro relacionado es:

- **Latencia:** Es la suma de los retardos producidos por la red en la transmisión de los datos, en donde un retardo es producido todos los factores de transmision y equipos involucrados en la transmisión de datos, como por ejemplo tiempos de transmisión, encolamientos, etc.

1.8.6.3 Integridad de servicio

La integridad del servicio se refiere a la calidad proporcionada durante el servicio. Por lo general el servicio respecto a su integridad se ve afectado por caídas del servicio, calidad de señal de voz, calidad de transmisión y *Throughput*.

- La caída del servicio: Es la imposibilidad de continuar con el uso del mismo una vez establecido, no se relaciona con el término del acceso al servicio por parte del usuario.
- La calidad de la señal de voz que recibe el terminal es un indicador del estado de la calidad de la red de voz. Este parámetro en redes 2G se

denomina RXQual[49] e informa los valores de BER (*Bit Error Rate*) medidos. En redes 3G se usa el parámetro Eb/No[50], representan la calidad de voz y se usan para valorar el MOS (*Mean Opinion Score*), el cual es el resultado de la comparación de la señal de voz recibida en el terminal y la señal de origen, el MOS puede tener valores entre 1 y 5 siendo 1 el valor más bajo.

- La calidad de transmisión de datos evalúa la calidad de transmisión de la información del usuario transmitido y es medida a través de la tasa de bloques errados (BLER-Block Error Rate).
- *Throughput* o velocidad de acceso a un servicio: Es la cantidad de bits por segundo que se transmite durante el tiempo que dura la transmisión.

1.8.7 PARÁMETROS DE CALIDAD EVALUADOS EN ECUADOR A OPERADORES DE SMA EN REDES 2G Y 3G

Los parámetros que los operadores de SMA deben cumplir en el Ecuador se describen en la Resolución TEL-042-01-CONATEL-2014 [21], en la cual se detallan parámetros que son evaluados periódicamente por la ARCOTEL. En la resolución se establecen valores objetivos de los parámetros mismos que los operadores de SMA deben cumplir, estos parámetros relacionan aspectos técnicos y administrativos. A continuación, se revisarán los parámetros que involucran aspectos técnicos:

- Porcentaje de llamadas establecidas: Este parámetro es el resultado del número de llamadas exitosas respecto del total de llamadas realizadas en el período de la cuarta hora con mayor tráfico en el mes. El valor objetivo establecido para este caso debe ser mayor o igual al 96%.
- Tiempo de establecimiento de llamada: Este parámetro es el tiempo medido en segundos desde que el usuario pulsa el botón de llamada, luego de marcar el número, hasta que recibe el tono de control. El valor objetivo es menor a 12 s para por lo menos el 96% de las muestras tomadas.

---

[49] RXQual: Este es un valor entero que puede estar entre 0 y 7 y refleja la calidad de la voz. 0 es la mejor calidad, 7 es lo peor.
[50] La relación Eb/No se mide en el receptor, y sirve para indicar qué tan fuerte es la señal.

- Porcentaje de llamadas caídas: Este parámetro es el porcentaje de llamadas caídas respecto del total de llamadas establecidas, medido en cada zona de control establecidos por la ARCOTEL que se encuentra en análisis en la cuarta hora de mayor carga del mes, y tiene valor objetivo no mayor al 2%.
- Nivel mínimo de señal en cobertura: Este parámetro es el nivel mínimo de señal que permite la prestación del servicio dentro de las zonas que el proveedor de SMA ha informado a los usuarios, tiene como valor objetivo el 95% de muestras que cumplan con los niveles mínimos de acuerdo a la tecnología. Tal como se muestra en la Tabla 1.7, es decir que el 95% de las muestras obtenidas deben superar los valores mínimos establecidos en la Tabla 1.6 en cada zona de cobertura analizada, para cada tecnología disponible.

Servicio	**2G**	**Servicio**	**3G**	
	RxLevel		RSCP	Ec/Io
Datos	≥ -80dBm	Datos	≥ -80dBm	≥ -12dBm
Voz	≥ -85dBm	Voz	≥ -85dBm	≥ -14dBm

Tabla 1.7 Niveles mínimos de cobertura de acuerdo a la tecnología [21]

CAPÍTULO II: PARÁMETROS TÉCNICOS DE CALIDAD DE SERVICIO EN LTE-A 4G

En el presente capítulo se establecerán y describirán los parámetros técnicos de calidad en base a la información obtenida en el Capítulo I. Adicionalmente, se describirán las características de equipamiento disponible para las mediciones de los diferentes parámetros.

2.1 INTRODUCCIÓN [1]

El constante crecimiento del tráfico en redes móviles celulares y el manejo de diferentes tipos de información, hacen necesario que las redes tradicionales evolucionen a redes de banda ancha y que proporcionen mecanismos de calidad de servicio (QoS) extremo a extremo, brindando de esta manera el tratamiento y soporte adecuados a cada tipo de tráfico generado por los usuarios. Al igual que otras tecnologías, la Unión Internacional de las Telecomunicaciones (UIT), definió las características para redes móviles celulares 4G en los sistemas IMT-Advanced.

El LTE-A es el primer estándar que cumple con las características descritas en el IMT-Advanced, con lo que se marca el comienzo de las redes móviles celulares de banda ancha.

La calidad de servicio (QoS), de manera general se la puede evaluar de diferentes puntos de vista, esto quiere decir, que se puede evaluar desde el punto de vista del usuario o desde el punto de vista tecnológico (técnico). En el presente estudio se evaluará la QoS desde el punto de vista del usuario, pero considerando aspectos técnico propios de la tecnología.

Los atributos de calidad de servicio no deben estar restringidos a unos pocos mecanismos externos de control de la calidad, sino que más bien el concepto de calidad de servicio debe ser capaz de proveer diferentes niveles de calidad de servicio usando las características técnicas y mecanismos de control de la red móvil celular. Los mecanismos no deben tener un significado ambiguo, los mecanismos de calidad de servicio deben permitir un uso eficiente de las capacidades de radio, permitir una evolución independiente de las redes de acceso y del núcleo de la red.

2.1.1 REQUERIMIENTOS DE QOS PARA LOS USUARIOS FINALES [24]

Según el estándar ETSI TS 123 107 [24] (en los requerimientos de alto nivel, se describe los requerimientos de QoS del usuario final), los usuarios finales evalúan el servicio sin considerar parámetros técnicos. Además, los usuarios, prefieren configuraciones o controles intuitivos que no involucren mucha dificultad, aplicaciones sin muchos requisitos técnicos, atributos de QoS suficientes para las aplicaciones, la calidad de servicio con soporte a futuros servicios y la calidad de servicio de extremo a extremo.

2.1.2 REQUERIMIENTOS TÉCNICOS DE QOS [24]

Los requerimientos técnicos abarcan una perspectiva de parte de la tecnología que se use, es decir, que los requerimientos técnicos cumplan con lo necesario para la operación de la red según esta ha sido diseñada, las redes deben transportar diferentes tipos de tráficos para diferentes servicios por lo que deben proporcionar un tratamiento adecuado para cada uno, cumpliendo características de diseño, esto quiere decir, que en el diseño de las redes se busca cumplir con los requerimientos mínimos de operación con el presupuesto más económico, esto no significa el más barato, en el momento de efectuar el diseño no se consideran todos los factores que influyen directa o indirectamente sino más bien se sigue un modelo genérico con el que se producen errores que al final producen una degradación de la calidad de servicio.

2.2 CALIDAD DE SERVICIO EN REDES LTE-A [25]

Hay suscriptores premium que desean tener una mejor experiencia de usuario en su dispositivo móvil con tecnología LTE-A. Estos usuarios están dispuestos a pagar más por un mayor ancho de banda y un mejor acceso a la red desde sus dispositivos. No sólo los abonados sino también algunos servicios necesitan una mejor gestión de las prioridades en la red (por ejemplo, una llamada VoIP). Para poder diferenciar y proporcionar los servicios adecuadamente, QoS juega un papel clave. La QoS define prioridades para ciertos clientes / servicios durante el tiempo de mayor congestión en la red.

Por lo que el concepto de QoS toma importancia cuando se requiere diferenciar servicios y usuarios. Por lo cual, los mecanismos de QoS permiten a los

operadores de SMA ofrecer, por una parte, acceso diferenciado a cada uno de los servicios que ofrecen, ya que cada servicio tiene diferentes requisitos de desempeño, como ancho de banda y retardo, y por otra parte, la diferenciación de los usuarios, esto quiere decir, proporcionar un mismo tipo de servicio a un grupo o grupos de usuarios, por ejemplo, diferenciar usuarios pre-pago de usuarios pos-pago en el servicio de acceso a Internet.

Como ya se revisó anteriormente en la calidad de servicio desde la perspectiva de los usuarios importan los aspectos de QoS que ellos perciben y dependen del servicio que requieran, por ejemplo, un usuario que utilice el servicio de navegación por Internet percibe la QoS por el tiempo que transcurre desde que realiza la petición hasta que la página web se carga totalmente.

Con la diferenciación de servicios se asocia una clasificación de servicios, y cada una de estas clases de servicio genera un flujo de paquetes, los cuales se les asignan recursos de la red según las exigencias del servicio. Técnicamente, antes de que los paquetes de datos correspondientes a un servicio sean transmitidos, un filtro de paquetes asocia los flujos de paquetes a una portadora[51] (*bearrer*), la que recibirá el tratamiento de QoS conforme a la clase de servicio a la que pertenece.

El concepto de portadora y señalización asociada permite reservar recursos de red antes de que los flujos de paquetes que se asignan a esa portadora sean enviados a la red.

2.2.1 PORTADORES EPS [26]

En la red LTE-A la QoS se implementa entre el UE y el PDN *Gateway*, y se aplica un conjunto de portadores (*Bearer)*. Un portador es básicamente un concepto virtual que representa un conjunto de configuraciones de red usadas para proporcionar tratamiento especial a cierto tipo de tráfico. Por ejemplo, paquetes de VoIP son priorizados por la red en comparación con el tráfico del navegador web.

[51] Portador: Es un concepto virtual que representa un conjunto de configuraciones de red usados para proporcionar tratamiento especial a cierto tipo de tráfico.

En la Figura 2.1 se puede observar que en LTE-A se definen portadoras en las interfaces de radio, S1, S5 y SGi, Además, la QoS se aplica en las portadoras de las interfaces de radio, S1 y al portador S5/S8, denominados colectivamente como portadores EPS (*Envolved Packet System)* como se muestra en la Figura 2.1.

Las interfaces mostradas en la Figura 2.1 fueron revisadas en el capítulo 1 del presente estudio, (ver sección 1.3.1 y 1.3.1.1).

Con el fin de comprender el concepto de QoS en redes LTE-A, se deben entender los tipos de portador (*Bearer)* y las propiedades asociadas a cada portador a través de un gráfico jerárquico tal y como se muestra en la Figura 2.2. Entre los tipos de portadores se tienen:

- Portador por defecto: Cuando el UE se conecta a la red por primera vez, se le asignará un portador por defecto que permanece activo mientras el UE esté conectado. El portador por defecto proporciona un servicio denominado del mejor esfuerzo. Cada portador predeterminado viene con una dirección IP. El UE puede tener portadores por defecto adicionales.
- Portador dedicado: El portador dedicado actúa como un portador adicional encima del portador por defecto, es decir, los portadores dedicados proporcionan un túnel dedicado a uno o más flujos de tráfico específico (VoIP, video, etc.). No requieren de una dirección IP separada, ya que sólo el portador por defecto necesita una dirección IP adicional. Por lo tanto, el portador dedicado está siempre enlazado a uno de los portadores por defecto.

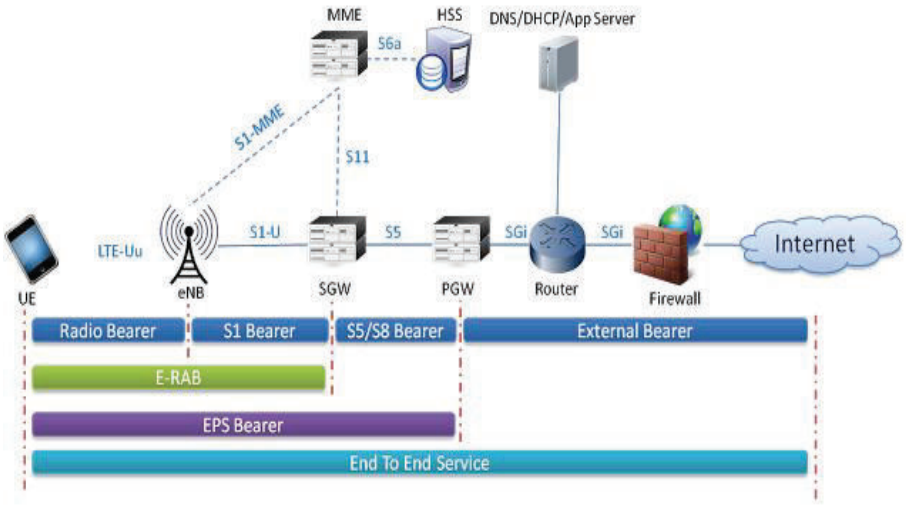

Figura 2.1 Servicios portadores en la red LTE-A [26]

El portador dedicado puede ser GBR[52] o no GBR (mientras que el portador por defecto sólo puede ser no GBR). El portador dedicado es útil para servicios como vos sobre LTE-A ya que proporciona una mejor experiencia de usuario.

Hay al menos un portador predeterminado establecido cuando el UE está conectado a la red LTE-A mientras que el portador dedicado siempre se establece cuando hay necesidad de proporcionar QoS a un servicio específico (como VoIP, video, etc.).

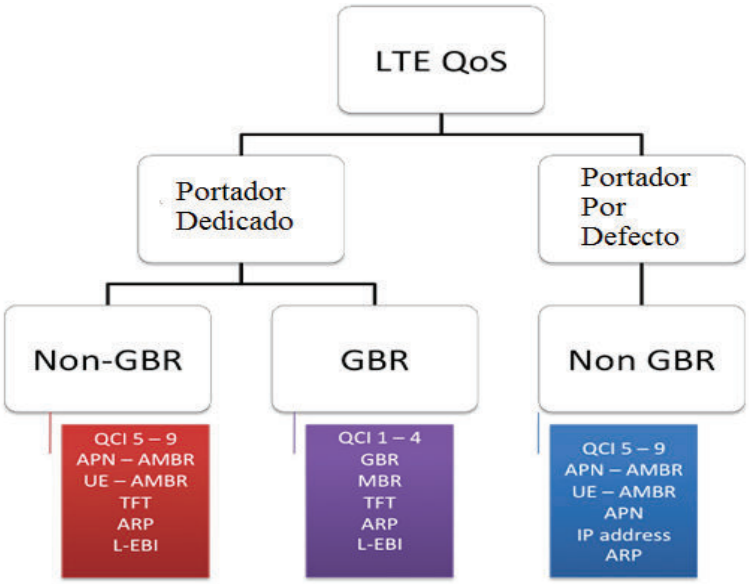

Figura 2.2 Servicio portador en la red LTE-A y calidad de servicio asociada [28]

[52] GBR: Tasa de bits garantizada, es una tasa de bits mínima solicitada por una aplicación.

En un caso típico, se pueden ejecutar múltiples aplicaciones en un UE simultáneamente, y cada aplicación tienen diferentes requisitos de QoS. Por ejemplo, un UE puede participar en una llamada VoIP mientras navega por una página web o descarga un archivo de un servidor FTP. El servicio de VoIP tiene requisitos más estrictos para QoS en términos de retardo de jitter que la navegación web y FTP, mientras que la descarga de archivos FTP requiere una tasa de pérdida de paquetes mucho más baja.

Con el fin de soportar múltiples requisitos de QoS, varios portadores se configuran dentro de la EPS, cada uno relacionado con una QoS. En términos generales, los portadores se pueden clasificar en dos categorías basadas en la naturaleza de la QoS, las cuales son:

- Portadores con tasa de bits mínima garantizada (GBR; *Guaranteed Bit Rate*) destinados a utilizarse en aplicaciones como VoIP. Éstas aplicaciones tienen un valor de GBR asociado para el cual se asignan permanentemente recursos de transmisión dedicados en el establecimiento / modificación del portador. Las tasas de bits superiores a la GBR pueden ser permitidas para un portador GBR si hay recursos disponibles. En este caso, se establece un parámetro denominado velocidad binaria máxima (MBR[53]; *Maximum Bit Rate*), que también se puede asociar con un portador GBR, el cual establece un límite superior en la velocidad binaria que puede esperarse de un portador GBR.
- Portadores no GBR que no garantizan una tasa de bits determinada, estos pueden ser utilizados para aplicaciones como la navegación web o transferencia FTP. Para estos portadores, no se asignan recursos de transmisión permanentemente.

En la red de acceso, es responsabilidad del eNB garantizar que se cumpla la QoS necesaria para un portador sobre la interfaz de radio. Cada portador tiene un Identificador de Clase (QCI; *Class Identifier*) asociado, y una Prioridad de Asignación y Retención (ARP; *Allocation and Retention Priority*).

[53] MBR: Establece un límite superior en la velocidad binaria que puede esperarse de un portador GBR cuando no existe congestión en la red.

2.2.2 PARÁMETROS DE QOS EN PORTADORES EPS [29]

En la red LTE-A, los parámetros QoS se definen a nivel de servicio y al nivel portador. Los parámetros QoS de SDF[54](*Service Data Flow*) son parámetros QoS de nivel de servicio mientras que los parámetros de QoS de portador EPS son parámetros de QoS a nivel de portador. Un agregado SDF se refiere a un grupo de SDF que tienen los mismos valores QCI (*QoS Class Identifier*) y ARP (*Allocation and Retention Priority*) y pertenecen a una sesión EPS.

Tanto QCI como ARP son los parámetros básicos de QoS aplicados a todos los portadores EPS. El QCI es particularmente importante porque sirve como una referencia que indica las características de rendimiento necesarias para los portadores. Además de estos dos parámetros básicos, hay otros parámetros de QoS, como GBR, MBR y AMBR que especifican las características de ancho de banda (o tasa de bits) de los portadores EPS. Los parámetros de QoS de los portadores EPS son los siguientes: QCI, ARP, GBR, MBR, APN-AMBR and UE-AMBR, estos parámetros se revisarán a continuación.

2.2.2.1 Identificador de clase (QCI) [25]

Cada QCI se caracteriza por la prioridad, estimación de retardo de paquetes y el promedio de paquetes perdidos. El QCI determina la forma en que se maneja cada paquete en el eNB. Sólo se ha normalizado una docena de QCI para que los proveedores puedan tener la misma comprensión de las características del servicio y proporcionar el tratamiento correspondiente. Con esto los operadores de LTE-A puede esperar un manejo de tráfico en toda la red independientemente de los fabricantes del equipo eNB. El conjunto de QCI estandarizadas y sus características se presentan en la Tabla 2.1 [25].

La administración de prioridad y retardo de paquetes de la etiqueta QCI determinan la configuración del control del enlace de radio (RLC - Radio Link Control) y control de acceso al medio (MAC - Medium Access Control), (ver Sección 1.5.6.1).

[54] SDF: Es un flujo o una agregación de flujos de paquetes IP de tráfico de usuarios clasificados por el tipo de servicio que usan.

QCI	Tipo de portadora	Nivel de prioridad	Retardo de paquetes en ms	Promedio de paquetes perdidos	Ejemplo de servicio
1	GBR	2	100	10^{-2}	Aplicaciones de voz
2		4	150	10^{-3}	Aplicaciones de video llamada
3		3	50	10^{-3}	Juegos en tiempo real
4		5	300	10^{-6}	Aplicaciones de video no en tiempo real
5	Non-GBR	1	100	10^{-6}	Señalización IMS
6		6	300	10^{-6}	Servicio basado en TCP (por ejemplo, www, e-mail, chat, FTP, P2P, video progresivo, etc.)
7		7	100	10^{-3}	Aplicaciones de vos y video, juegos interactivos
8		8	300	10^{-6}	Servicio basado en TCP (por ejemplo, www, e-mail, chat, FTP, P2P, video progresivo, etc.)
9		9	300	10^{-6}	

Tabla 2.1 Estandarización de las características de los valores QCI [25]

2.2.2.2 Prioridad de asignación y retención (ARP - *Allocation And Retention Priority*) [25][26]

El ARP se utiliza para para decidir si el portador solicitado debe ser establecido o no, dependiendo de la congestión de la red. También regula la priorización para la preferencia con respecto a una nueva solicitud de establecimiento de conexión. Una vez establecido satisfactoriamente el portador, el ARP no tiene ningún impacto en el tratamiento de reenvío de paquetes a nivel de portador. Tal tratamiento de reenvío de paquetes debe ser determinado únicamente por los otros parámetros de QoS a nivel de portador tales como QCI, GBR y MBR.

Cuando se necesita crear un nuevo servicio portador en una red LTE-A con insuficiencia de recursos, una entidad LTE-A (por ejemplo, P - GW, S - GW o eNB) decide, en base al valor de ARP (un número entero de 1 a 15, siendo 1 el más alto nivel de prioridad), si en base a dicho valor se procede a eliminar el portador existente y crear uno nuevo. Por ejemplo, eliminar el servicio portador

con baja prioridad ARP para crear uno con alta prioridad ARP, o negarse a crear una nuevo.

Una vez que se crea un nuevo portador y los paquetes se entregan a través del ARP no cambiará la prioridad del paquete entregado, por lo tanto, el nodo de red reenvírá los paquetes, independientemente de sus valores de ARP.

Uno de los ejemplos más claros de la utilización de la ARP es una llamada de VoIP de emergencia.

2.2.2.3 MBR (Maximum Bit Rate) [26]

El parámetro MBR se utiliza para un portador de tipo GBR, y sirve para indicar la velocidad binaria máxima permitida en la red. En el caso de que un usuario envíe más información de lo que el operador de SMA se compromete a entregar, entonces cualquier paquete que llega al portador después de que se supere el MBR especificado es descartado.

2.2.2.4 APN-AMBR (Access Point Name - Aggregate Maximum Bit Rate) (UL / DL) [26]

El APN - AMBR es un parámetro de suscripción que es almacenado por la APN (*Access Point Name*) en el HSS (*Home Subscriber Server*). El APN - AMBR se usa para limitar la velocidad binaria global, y que es proporcionado a través de todos los portadores no GBR y a través de todas las conexiones PDN del mismo APN.

Cada uno de estos portadores no GBR potencialmente podría utilizar toda la APN - AMBR, por ejemplo, cuando los otros portadores no GBR no llevan tráfico.

Los portadores GBR no son influenciados por el APN - AMBR. El P- GW hace cumplir la APN - AMBR en el enlace descendente. El APN - AMBR en el enlace ascendente se hace cumplir desde el UE y en el P – GW, tal y como se muestra en la Figura 2.3.

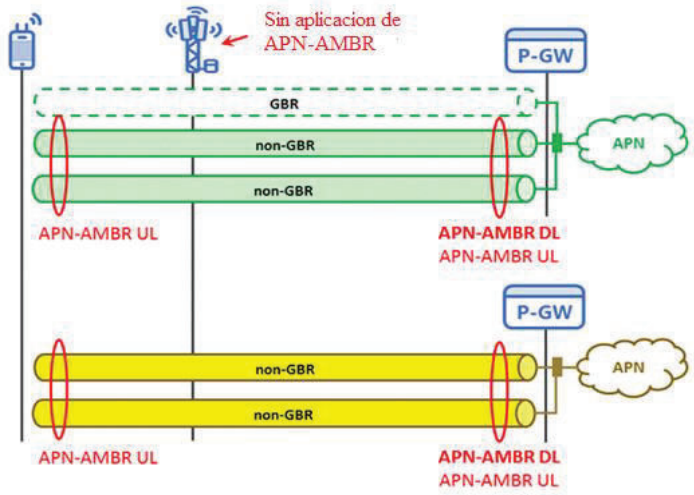

Figura 2.3 Entidades que cumplen el APN – AMBR [27]

2.2.2.5 UE-AMBR (UL / DL) [26]

Un UE puede tener varias conexiones establecidas (por ejemplo, conexiones de Internet, conexiones para VoIP usando IMS, etc.) y mantiene una dirección IP única para cada una de sus conexiones. El UE-AMBR (UL / DL) indica el ancho de banda máximo permitido para todos los portadores no-GBR EPS asociadas a la UE sin importar cuántas conexiones el UE tiene establecido.

2.2.2.6 TFT (Traffic Flow Template) [28]

TFT o plantilla de flujo de tráfico siempre está asociada a un portador dedicado y por otra parte el portador predeterminado puede o no tener TFT. Como se mencionó anteriormente, el portador dedicado proporciona QoS a un servicio o aplicación y TFT define reglas para que UE y la red LTE-A conozcan la relación entre el paquete IP y el portador dedicado en el que debe enviarse el paquete IP.

2.2.2.7 L-EBI (Linked EPS Bearer ID) [28]

Representa el identificador del portador del EPS vinculado. Como ya he comentado anteriormente sobre el portador dedicado y por defecto, se conoce que cada portador dedicado está siempre vinculado a uno de los portadores predeterminados. L-EBI (*Linked EPS bearer ID*) le indica al portador dedicado a cuál portador predeterminado se encuentra asignado.

2.2.2.8 Dirección IP / PDN [28]

Cada portador predeterminado está conectado a alguna red PDN y tiene su propia dirección IP mientras que el portador dedicado no necesita esto ya que está vinculado al portador predeterminado.

2.2.3 QOS EN EL SERVICIO DE VOZ EN LA RED LTE-A [43][44]

Cuando un dispositivo habilitado para VoLTE (voz sobre LTE) se enciende, éste se conecta a la infraestructura de la red LTE-A y se le asignan dos portadores predeterminados EPS: uno para señalización SIP[55] (*Session Initiation Protocol*) (QCI No GBR de 5), y otro para la red LTE (QCI No GBR de 5 a 9). Esta asignación de doble portador permite que el equipo de usuario se comunique en los idiomas tanto de LTE como de IMS (SIP).

El flujo de llamadas para habilitar VoLTE se describe a continuación y se ilustra en la Figura 2.4.

1. El usuario indica en su teléfono, habilitado para LTE-A, la solicitud para realizar una llamada de VoIP (voz sobre IP).
2. La red LTE-A identifica y selecciona una puerta de enlace PDN (P-GW) que permita una conexión con la IMS.
3. Se establece un portador predeterminado para la comunicación SIP desde el equipo de usuario hasta la P-GW seleccionada.
4. El equipo de usuario envía un mensaje SIP "Invitar" hacia la IMS. Un Protocolo de descripción de sesión (SDP[56], *Session Description Protocol*) lleva el requisito de QoS y está contenido en el mensaje SIP.
5. La IMS obtiene la información para el ajuste de QoS requerida del mensaje SIP recibido.
6. Para aplicar política de tarificación, la IMS envía una solicitud inicial de control de crédito (CCR, *Credit Control Request*) al OCS[57]

---

[55] Protocolo de iniciación de sesión (SIP): Es un protocolo de comunicaciones para la señalización, con el propósito de controlar las sesiones de comunicación multimedia.
[56] *Session Description Protocol* (SDP): Es un protocolo usado para describir los parámetros de inicialización de los flujos multimedia.
[57] Sistema de facturación en línea (OCS): Es un sistema que permite a un proveedor de servicios de comunicaciones cobrar a sus clientes, en tiempo real, basándose en el uso del servicio.

(*Online Charging System*), sobre la interfaz Ro[58] y se reserva un valor inicial de crédito anticipando la necesidad de medir con precisión el consumo de saldo durante la llamada.

7. El requisito de QoS es enviado desde la IMS a la PCRF a través de la interfaz Rx[59].
8. La PCRF crea reglas procesables sobre tarificación y calidad de servicio, y las transmite a través de la interfaz Gx[60] a la Función de Cumplimiento de Políticas y Tarificación (PCEF, *Policy and Charging Control*) que se encuentra en la P-GW en la red LTE-A.
9. Ahora la P-GW envía una solicitud para el establecimiento de un "portador dedicado" independiente (con un QCI de 1) al equipo de usuario.
10. Después de que al equipo de usuario se le asigna un portador dedicado, el equipo de usuario envía un mensaje SIP "UPDATE" a la IMS.
11. La IMS completa el proceso de configuración y establece la llamada.
12. Los paquetes bidireccionales de llamada VoIP son enviados dentro de la red LTE-A, entre la P-GW y el equipo de usuario.
13. Para tarifar, la IMS solicita crédito al OCS en el transcurso de la llamada (por ejemplo, cada 10 segundos). Si no existe crédito, se devuelve un mensaje 402 (pago requerido) al equipo de usuario y la llamada es cancelada. Si el crédito expira durante la llamada, ésta se da por terminada.
14. Cuando se termina la llamada, el equipo de usuario envía un mensaje SIP "BYE" (adiós) a la IMS.
15. La IMS envía una petición de terminación de CCR al OCS, que termina la medición de tarificación y activa las acciones a fin de recolectar los registros de facturación.
16. La IMS informa a la PCRF sobre la terminación de la llamada.

---

[58] Interfaz Ro, permite la comunicación entre las entidades de red IMS y el OCS.
[59] Interfaz Rx, interfaz que permite la comunicación entre el IMS y el PCRF.
[60] Interfaz Gx, permite el aprovisionamiento y retiro de políticas de control de carga, y se encuentra ubicada entre el PCRF y el PCEF.

17. La PCRF indica a la PCEF que termine la facturación, e indica a la P-GW para que se descarte el portador dedicado establecido para la llamada de VoIP.

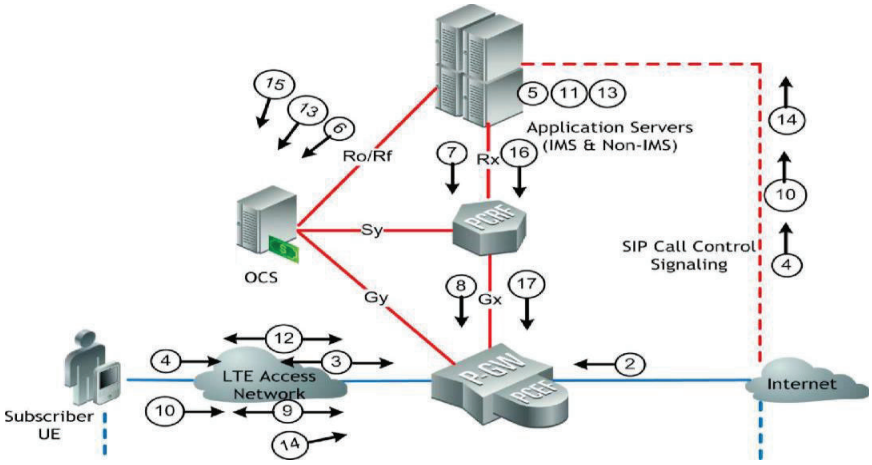

Figura 2.4 Arquitectura y flujo de llamada sobre VoLTE [43]

2.2.3.1 Verificación de la calidad de la llamada

Para garantizar una calidad positiva de la experiencia del usuario en servicio de llamadas VoLTE, los proveedores de SMA necesitan un mecanismo de retroalimentación que mida la calidad real (es decir, la entregada). Con esta retroalimentación los operadores de SMA pueden comparar la calidad entregada con el valor QCI y la expectativa de calidad correspondiente como se vio en la Tabla 2.1, en la columna de "Retardo de paquetes". Si la calidad entregada no es buena, entonces la retroalimentación permite a los operadores de SMA diagnosticar y corregir el problema.

Más allá de simplemente tener valores de latencia y los puntajes medios de opinión (MOS[61], *Mean Opinion Score*) para VoIP, los operadores de SMA también pueden beneficiarse de una visión que se extiende a la segmentación a nivel de dispositivo. Es decir, los problemas relacionados con sistemas operativos, fabricantes o modelos en particular se pueden identificar y abordar rápidamente.

Los proveedores de SMA también se benefician el obtener una visión clara del efecto que VoLTE tiene sobre la calidad del portador predeterminado cuando se

[61] MOS: Una unidad de medida referente a la calidad del habla humana en sistemas de telefonía VoIP, representada con un porcentaje.

está procesando un gran número de llamadas. Las llamadas VoLTE son procesadas con una tasa de bits garantizada, pero como afecta esto a la capacidad total de la red de acceso, es algo que los proveedores de SMA deben entender para que puedan planificar la capacidad de la red. En otras palabras, obtienen información de que sucede con el resto del tráfico cuando las llamadas VoLTE consumen (o al menos reservan) considerables recursos de ancho de banda de la red LTE-A.

Las métricas relacionadas con la calidad de servicio en VoLTE a nivel de red son velocidad de datos, retardo, jitter y porcentaje de paquetes perdidos; por otra parte, las métricas a nivel de aplicación son tiempo de establecimiento de llamada, promedio de llamadas establecidas con éxito, llamadas fallidas, llamadas caídas, retransmisiones y MOS.

2.2.4 APROVISIONAMIENTO Y APLICACIÓN DE QOS [28]

En el aprovisionamiento de QoS se indica cuál de las entidades de la red LTE-A proporciona los valores de parámetros de QoS. En la aplicación de QoS se determina qué entidades EPS establecen los parámetros de QoS para los portadores EPS.

2.2.4.1 Aprovisionamiento de QOS [28]

En la Figura 2.5, se observan qué entidades de red asignan los diferentes parámetros de QoS. Los parámetros de QoS que son aplicados a un portador predeterminado son aprovisionados mediante la información de suscripción que se encuentra en el HSS configurada por el operador de red. Cuando el portador predeterminado es activado, el MME descarga el perfil QoS del portador desde el HSS y lo envía a las entidades de la red EPS.

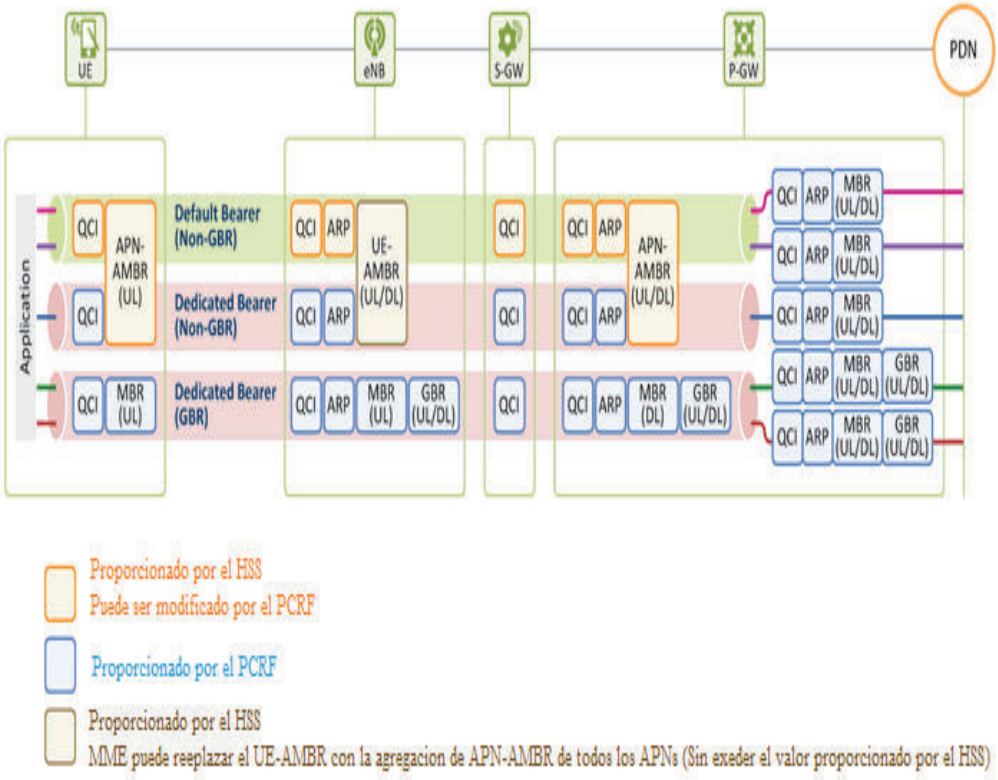

Figura 2.5 Aprovisionamiento de QoS [28]

Los parámetros de QoS para el portador predeterminado proporcionado por el HSS se pueden modificar cuando son autorizados por el PDRF[62] (*Policy and Charging Rules Function*) al crear una sesión EPS. El UE-AMBR controlado por un eNB es proporcionado por el HSS, pero puede ser modificado por el MME. En tal caso, el MME puede sustituir el UE-AMBR existente por el APN-AMBR, en la medida en que el nuevo valor no exceda el valor proporcionado por el HSS.

Los parámetros de QoS aplicados a un portador dedicado son aprovisionados por PCRF. El PCRF determina los parámetros de QoS para el portador basándose en la información de suscripción que recibió del Repositorio de Perfil de Suscriptor (SPR – *Subscription Profile Repository*[63]) cuando el portador está activado.

[62] PDRF: Es la parte de Evolved Packet Core (EPC) que soporta la detección de servicio de flujo de datos, aplicación de políticas de QoS basada en el flujo de datos o tráfico.
[63] SPR: Es una entidad lógica de la arquitectura 3GPP PCC (Policy and Charging Control) que contiene información relacionada con políticas de manejo de la calidad de servicio de los subscriptores.

2.2.4.2 Aplicación de QoS [28]

Durante la aplicación de QoS, se realiza la detección del tráfico de usuario (flujos IP, portadores EPS), a continuación, se aplican las reglas de QoS a cada uno de los portadores EPS detectados.

En la Figura 2.6 se muestra que las entidades EPS establecen y aplican los parámetros de QoS del portador EPS. Los parámetros de QoS del portador EPS aplicados en el S-GW son iguales que en el P-GW excepto para los APN-AMBR.

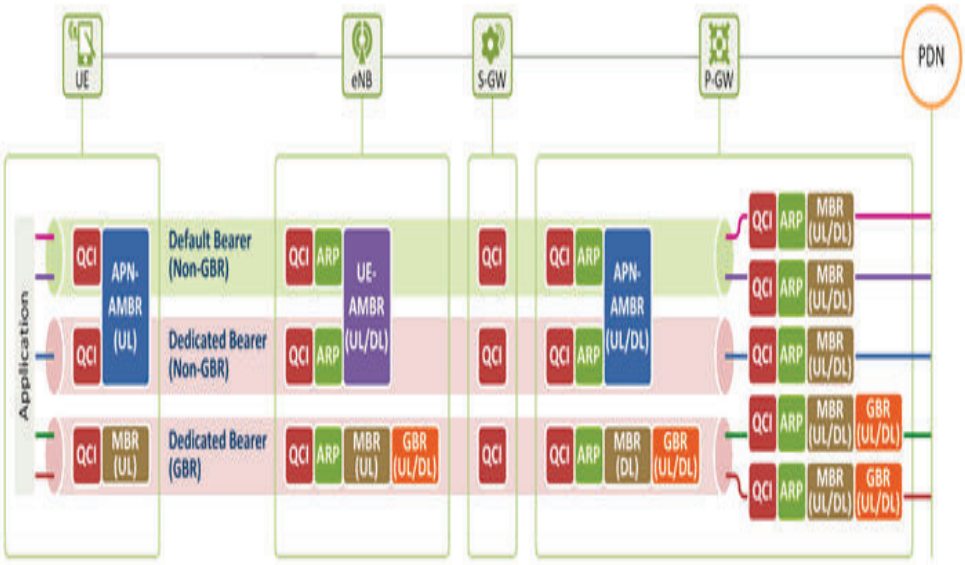

Figura 2.6 Aplicación de QoS [28]

2.2.5 PARÁMETROS DE CALIDAD DE SERVICIO TÉCNICOS

Como se pudo ver, con el estudio previo de la calidad de servicio en redes LTE-A, la red es la encargada de suministrar la calidad de servicio a los usuarios, dependiendo del tipo de tráfico que generan, por lo que para el control externo de la calidad de servicio que los usuarios obtienen se debe prestar atención a las siguientes consideraciones:

- Se debe evaluar la relación nivel de cobertura con la velocidad de datos obtenida, esto permitirá verificar qué niveles de cobertura permiten obtener de la red un mínimo aceptable de calidad de servicio, relacionado a requisitos de las aplicaciones.
- Una vez determinado nivel de cobertura mínimo se procede a evaluar, dentro de los niveles de cobertura correctos, el comportamiento de las

aplicaciones, es decir se evalúan los retardos que sufren los datos, la velocidad obtenida y si el servicio o aplicación funciona de manera adecuada (responde a la calidad de servicio desde la perspectiva del usuario).

- Se debe evaluar la velocidad de datos tanto en el enlace de subida como en el de bajada, a fin de verificar que ninguno de los enlaces produzca problemas con el correcto funcionamiento de las aplicaciones.

De lo considerado anteriormente se procede a estudiar los parámetros de cobertura relacionados a la tecnología LTE-A.

2.2.5.1 Reference Signal Received Power (RSRP) [30]

Es la potencia de la señal en una celda relacionada con la métrica que sirve como entrada para procesos de re elección de una celda y decisiones de *handover*. Para una celda en particular, el RSRP se define como el promedio de la potencia (en Watios) de los *Resourse Elements*[64] (REs) que transportan las señales de referencia (RS) de una celda sin considerar el ancho de banda.

Las mediciones de RSRP normalmente son expresados en dBm y son usadas principalmente para establecer el ranking de las celdas disponibles en función de la fuerza de la señal. Generalmente se utilizan las señales de referencia, estudiadas en el primer capítulo del presente estudio, (ver sección 1.5.4.1.1), que se reciben en el puerto de la primera antena para determinar el RSRP.

2.2.5.2 Reference Signal Received Quality (RSRQ) [30]

Es una métrica de la medida de la calidad de la señal recibida, esta métrica es usada principalmente para proveer un ranking de las celdas disponibles en función de la calidad de la señal. La RSRQ es usada en los procedimientos de reselección de la celda o procesos de *handover* cuando la métrica de RSRP no es suficiente para efectuar los procedimientos, esta métrica se encuentra definida como se muestra en la Ecuación 2.1.

$$RSRQ = \frac{(N * RSRP)}{(LTE\ carrier\ RSSI)} \qquad \text{Ec (2.1)}$$

[64] Es la representación del uso de una portadora y un símbolo, es la parte discreta más pequeña de la estructura que representa los datos de un canal físico o señal.

Dónde:

N: Número de bloques de recursos (RB) del ancho de banda del portador LTE-A RSSI

RSRP: Nivel de potencia promedio de los RE sin considerar el ancho de banda.

LTE carrier RSSI: Promedio lineal de toda la potencia recibida

2.2.5.3 Received Signal Strength Indicator (RSSI) [30]

Es el promedio lineal de toda la potencia recibida observada solo en símbolos OFDM que transporta señales de referencia hacia el UE, incluyendo tanto celdas a las que se encuentra enganchado el UE como las celdas a las que no se encuentra enganchado, además se consideran señales co-canal, interferencia de canales adyacentes y ruido térmico, no se considera el ancho de banda de los N recursos de radio. EL RSSI es usado como parámetro de entrada para el cálculo del parámetro LTE-A RSRQ previamente revisado.

De la Ecuación 2.1 se observa que se considera el efecto combinado de la potencia de la señal y la interferencia que debido a la inclusión de los parámetros RSSI y RSRQ. También se observa que matemáticamente RSRQ es proporcional al parámetro RSRP.

2.2.5.4 Tasa de error por bloque (BLER - *Block Error Rate*)

El BLER es una medida del número de bloques erróneos recibidos en relación al número total de bloques recibidos en una transmisión de datos a través de la red durante un período determinado. El BLER es medido después del proceso de decodificación y con el uso de la comprobación de redundancia cíclica (CRC) en cada uno de los bloques de datos recibidos.

El BLER es usado en la tecnología LTE-A para verificar si el terminal se encuentra sincronizado o no sincronizado, durante el proceso de monitoreo de enlaces de radio. EL BLER normal en LTE-A es del 2%, lo cual indica que el terminal se encuentra sincronizado, en cambio, un BLER del 10% indica que el equipo de usuario no se encuentra sincronizado [31].

2.2.6 RESUMEN DE PARÁMETROS A EVALUARSE

En el presente apartado se realizará un breve resumen de los parámetros que se evaluará durante las pruebas a realizarse, adicional se prestará una pequeña descripción de las pruebas asociadas, tal y como se muestra en la Tabla 2.4.

Medición Realizada	Parámetros Técnicos involucrados	Datos Involucrados en el análisis	Parámetros obtenidos como resultado del análisis
Prueba de descarga de archivos desde un servidor FTP	Parámetros de Cobertura RSRP y RSRQ	Parámetros de Cobertura RSRP y RSRQ, Throughput de DL obtenido	Niveles mínimos de cobertura RSRP y RSRQ en el enlace de bajada que permitan obtener velocidades acordes a la tecnología LTE-A
Prueba de carga de archivos desde un servidor FTP	Parámetros de Cobertura RSRP y RSRQ	Parámetros de Cobertura RSRP y RSRQ, Throughput de UL obtenido	Niveles mínimos de cobertura RSRP y RSRQ en el enlace de subida que permitan obtener velocidades acordes a la tecnología LTE-A
Pruebas de solicitudes realizadas a páginas web	Tiempo de carga de páginas web	Parámetros de Cobertura RSRP y RSRQ, tiempo de carga de páginas web	Niveles mínimos de cobertura RSRP y RSRQ que permitan obtener los menores tiempos de carga

Tabla 2.2 Resumen de parámetros a ser evaluados

Es importante mencionar que los parámetros QCI, ARP, MRB, APN-AMRB, UE-AMBR, TFT, L-EBI e IP / PDN de la red LTE-A son usados para proporcionar calidad de servicio mediante indicadores y configuraciones realizadas por el administrador de la red y están asociados a portadores (*bearer*), como se pudo observar en el estudio realizado previamente en el presente capitulo, por lo tanto, para efectuar un control externo de la calidad de servicio, se analizará el comportamiento de los parámetros de cobertura, debido a que si no se tiene un

buen nivel de cobertura en la interfaz de radio no se puede lograr una adecuada calidad de servicio en la red LTE-A.

También es importante mencionar que el parámetro de cobertura RSSI no será parte del análisis debido a que involucra no solo parámetros técnicos propios de la red del operador de SMA sino interferencias externas y no proporciona una relación respecto de la calidad del canal de radiofrecuencia.

2.2.7 CONSIDERACIONES PREVIAS A ESTABLECER PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN [32]

Para poder establecer un adecuado procedimiento de medición que permita enfocar el estudio en la dirección adecuada, es necesario revisar varios factores, así como definiciones que se encuentran involucradas en dicho proceso como velocidad de datos, tipos de escenarios, tipos de terminal, nivel de señal mínima requerida, disponibilidad de cobertura, bandas de frecuencia y ancho de banda.

2.2.7.1 Velocidad de datos

La velocidad de datos es uno de los factores importantes que permiten evaluar el servicio que los operadores de SMA entregan a sus usuarios. La velocidad de datos depende de factores como niveles de cobertura, porcentaje de ocupación de la red, velocidad permitida por el tipo de terminal, entre otros. Por tal motivo, para obtener las velocidades teóricas ofrecidas por la tecnología se considera una red con baja carga de tráfico de datos, es decir, se considera que un único usuario se encuentra conectado a la celda y que en celdas vecinas se tiene nivel de tráfico de datos bajo, por lo que es necesario considerar que las velocidades obtenidas sean inferiores a las teóricas y dependerán de la carga de la red, este aspecto se considerará en el momento del análisis debido a que normalmente la red experimenta horas de alto tráfico, en días laborables y en horario de oficina.

2.2.7.2 Ambiente de medición

En el ambiente de medición se encuentran tanto factores ambientales como geográficos, debido a que no es lo mismo efectuar una medición en un entorno con obstáculos que atenúen la señal o produzcan reflexiones. Así mismo, hay que considerar que en un ambiente con edificaciones la densidad de usuarios aumenta considerablemente, tomando en cuenta los horarios, ya que en horas

de oficina se tendrá mayor tráfico en zonas empresariales y bajo tráfico en zonas residenciales.

Para el presente proyecto de titulación, se realizarán las pruebas (análisis) en una de las zonas empresariales dentro de la ciudad de Quito, con lo que se considera un ambiente con obstáculos (debido a los edificios) y de alto tráfico (realizado en horario de oficina).

Adicionalmente se evalúa a las operadoras de SMA, de este modo el análisis no se estará asociado a un fabricante ya que cada operador selecciona los proveedores de equipos de manera autónoma.

Para analizar el caso de qué tan buena calidad de servicio presta la red se asociará la mayor cantidad de servicios. Como ya se mencionó anteriormente, cada flujo de datos es tratado de manera distinta, para el caso de Ecuador los servicios disponibles en la red LTE-A son netamente de datos. Será de interés analizar el tratamiento que los datos en las redes LTE-A de los operadores de SMA, especialmente de datos pertenecientes a aplicaciones que permiten efectuar transferencias de archivos y acceso a navegación por Internet.

2.2.7.3 Tipos de terminales disponibles en el mercado ecuatoriano

Como se describió en el primer capítulo en la sección 1.5.4.1, las velocidades alcanzadas por los terminales se encuentran asociadas a la categoría de los terminales, por lo que es necesario verificar en el mercado la disponibilidad de terminales móviles y su categoría.

Para el presente trabajo se revisaron terminales de gama alta, media y baja de distintas marcas disponibles en Ecuador, a la información de base a los terminales ofrecidos por los operadores de SMA y de acuerdo a especificaciones técnicas de los mismos, dicha información se presenta en la Tabla 2.2. Para un mejor entender de las categorías de los terminales móviles en redes LTE-A puede revisarse la sección 1.3.3.1.

En el mercado los terminales móviles dependiendo de su costo tienen mayores prestaciones y mejores tecnologías. Tal como se puede observar en la Tabla 2.2 en el Ecuador se tienen terminales móviles en su mayoría de categoría #4. Es decir que la mayoría de los usuarios pueden tener velocidades de 150 Mbps en

el enlace de subida y de 50 Mbps en el enlace de bajada, considerando estas velocidades teóricas y máximas, es decir en un ambiente ideal sin mucho tráfico en la red y sin considerar factores propios de un sistema inalámbrico móvil.

Equipos 4G con tecnología LTE-A disponibles en Ecuador.			
Marca	Modelo	Categoría	Máxima velocidad alcanzable
IPHONE	SE	Cat.4	150 Mbit/s 50 Mbit/s
HUAWEI	P8	Cat.4	150 Mbit/s 50 Mbit/s
LENOVO	A2010	Cat.4	150 Mbit/s 50 Mbit/s
HUAWEI	Y560	Cat.4	150 Mbit/s 50 Mbit/s
HUAWEI	Y635	Cat.4	150 Mbit/s 50 Mbit/s
SAMSUNG	J1 ACE	Cat.4	150 Mbit/s 50 Mbit/s
HUAWEI	Y550	Cat.4	150 Mbit/s 50 Mbit/s
NOKIA	LUMIA 830	Cat.4	150 Mbit/s 50 Mbit/s
SAMSUNG	S6	Cat.6	300 Mbit/s 50 Mbit/s
SAMSUNG	A5	Cat.6	300 Mbit/s 50 Mbit/s
NOKIA	LUMIA 635	Cat.3	100 Mbit/s 50 Mbit/s
SONY	XPERIA Z5	Cat.6	300 Mbit/s 50 Mbit/s
SONY	XPERIA M4	Cat.4	150 Mbit/s 50 Mbit/s
SONY	XPERIA M5	Cat.4	150 Mbit/s 50 Mbit/s
HUAWEI	G8	Cat.4	150 Mbit/s 50 Mbit/s
HUAWEI	G620	Cat.4	150 Mbit/s 50 Mbit/s
HUAWEI	G7	Cat.4	150 Mbit/s 50 Mbit/s
ALCATEL	POP 2	Cat.4	150 Mbit/s 50 Mbit/s
SAMSUNG	A3	Cat.4	150 Mbit/s 50 Mbit/s
SONY	XPERIA Z3	Cat.6	300 Mbit/s 50 Mbit/s
HUAWEI	MATE 8	Cat.6	300 Mbit/s 50 Mbit/s
LG	G3	Cat.6	300 Mbit/s 50 Mbit/s
LG	G4	Cat.6	300 Mbit/s 50 Mbit/s

Tabla 2.3 Smartphone 4G/LTE-A disponibles en Ecuador

2.2.7.4 Movilidad durante las pruebas

Para el control de la velocidad de datos que los usuarios perciben; se establecerán puntos de medición fijos, ya que si se efectúa un *drive test* en el que se mida la velocidad de datos se tendrían que considerar en cada punto de medición las variaciones de las condiciones del medio de transmisión como son variaciones de niveles de señal, procesos de *hand over*, reflexiones, entre otros. Hay que considerar además que el seleccionar puntos de medición puede ser una tarea muy complicada ya que no se puede evaluar toda la zona de cobertura de los operadores de SMA.

Para solventar todas estas complicaciones se busca analizar los rangos en los cuales los parámetros de cobertura permitan obtener un servicio con calidad y acorde a la tecnología LTE-A, posteriormente la ARCOTEL podrá evaluar a los operadores de SMA realizando un *drive test* en la zona de cobertura de cada operador, facilitando así el control de las redes LTE-A en el Ecuador.

2.2.7.5 Disponibilidad de cobertura

Los requisitos técnicos de cobertura tienen asociados niveles de cumplimiento[65], los mismos que se definen como porcentajes de ubicaciones, dentro de la zona de cobertura, es necesario considerar que en un punto de medición las condiciones de propagación radio eléctrica pueden variar por lo que es necesario establecer un porcentaje de cumplimiento para varias ubicaciones dentro de la zona de cobertura[66] a evaluarse.

2.2.7.6 Banda de frecuencias y ancho de banda

El ancho de banda que los operadores de SMA tienen asignado, es un factor importante para la velocidad máxima alcanzable, el organismo de control ARCOTEL (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones) adopto los siguientes esquemas: A5 (700 MHz), B5 (AWS 1700/2100 MHz), B3(1900 MHz) y C1 (2.5 GHz) según consta en la resolución TEL-804-29-CONATEL-2012, y tal como se muestra en la Figura 2.7.

En la Figura 2.7, se muestra la segmentación sugerida por la UIT, en la cual se divide a la banda de frecuencia de 700, 1700/2100, 1900 y 2500 MHz en varios rangos de frecuencia (anchos de banda), en donde cada letra representa uno de los rangos, las letras son asignadas comenzando por anchos de banda de menor frecuencia. Además, se dividen los anchos de banda en dos grupos uno para enlace de uplink y otro para el de downlink. Estos grupos son separados por una banda de guarda y cada ancho de banda de *uplink* tiene su correspondiente ancho de banda para *downlink*, identificados con la misma letra diferenciados por un apostrofe en la letra del ancho de banda de *downlink*.

---

[65] Nivel de cumplimiento: Es el porcentaje de muestras que deben cumplir cierto valor mínimo del total de muestras recolectadas.
[66] Zona de cobertura: Es la zona que el operador de SMA ha publicado en su página web o ha publicado por medios audio visuales a sus clientes.

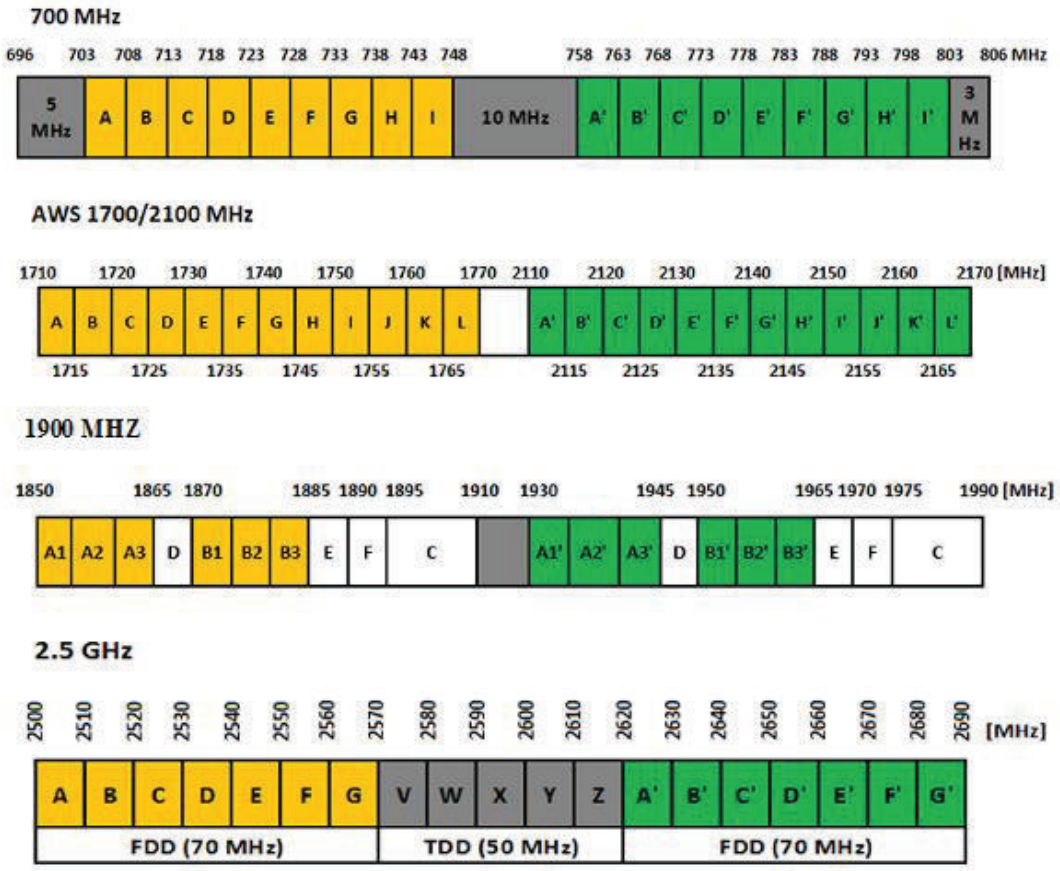

Figura 2.7 Esquemas de bandas de frecuencias A5, B5, B3 y C1 [8]

De los esquemas adoptados en Ecuador la ARCOTEL asigna las siguientes bandas de frecuencias para la operación de la tecnología LTE-A.

A la empresa CNT E.P. se le asigna en las bandas de 700 MHz un total de 30 MHz (15+15 MHz, los bloques G-G', H-H' e I-I') y AWS 1700-2100 MHz un total de 40 MHz (20+20 MHZ, los bloques A-A', B-B', C-C' y D-D').

La empresa Consorcio Ecuatoriano de Telecomunicaciones S.A. (CONECEL), se le asigna en las bandas de 1900 MHz un total de 20 MHz (10 MHz los bloques B3-B3' y 10 MHz los bloques F-F') y en la banda AWS 1700-2100 MHz un total de 40 MHz (20+20 MHz, los bloques E-E', F-F', G-G' y H-H').

A la operadora OTECEL S.A se le asigna en las bandas de 1900 MHz un total de 50 MHz (25+25 MHz, los bloques A1-A1', A2-A2', A3-A3', B1-B1' y B2-B2')

En base a este ancho de banda asignado, los operadores deben implementar una adecuada eficiencia espectral (bit por hercio) para que puedan alcanzar velocidades objetivo o teóricas presentadas por el estándar.

La frecuencia de operación asignada influye en la propagación de la señal radio eléctrica, esto se refleja directamente en atenuaciones propias de la propagación y atenuaciones por penetración a interiores. Por lo tanto, el nivel de señal requerido es distinto, dependiendo de la banda de frecuencia en la que el servicio esté operando.

2.2.8 DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPAMIENTO EMPLEADO EN LAS PRUEBAS

El equipamiento a utilizarse durante las pruebas de manera general se encuentra conformado por los siguientes componentes: Equipo de medición, GPS, *software* de recolección de datos y servidor para la recolección de datos, estos componentes dependiendo de la tecnología a usarse pueden variar. Un modelo genérico de dicho equipamiento se muestra en la Figura 2.7, dicho modelo es lo más cercano a lo que se usará para las mediciones planteadas.

En la Figura 2.7 se observan los componentes involucrados, un equipo que cuenta con las características de uno o varios terminales móviles, un scanner, un GPS, antenas, una unidad de almacenamiento de datos, alimentación eléctrica y un *software* para la configuración y control de todos los componentes de *hardware* además de la presentación de la recolección de datos.

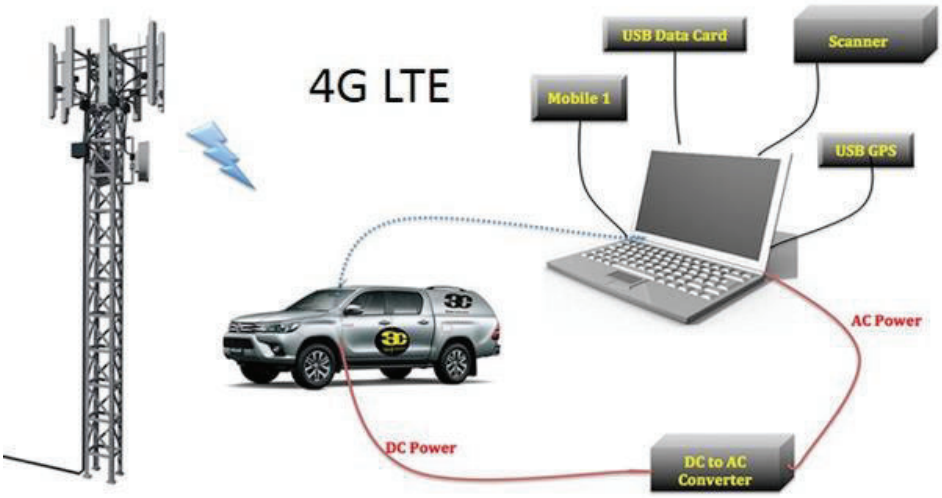

Figura 2.7 Componentes básicos de un drive test [34]

En el vehículo, propiedad de la ARCOTEL, se encuentra instalado todo el equipamiento de medición excepto el de almacenamiento, debido a que la

información recolectada se envía mediante un enlace inalámbrico a un servidor que se encuentra en la red interna de la ARCOTEL.

En el presente estudio técnico se usará como equipo de medición el sistema Sierra Wireless AirPrime modelo MC7700 propiedad de la ARCOTEL mostrada en la Figura 2.8, mismo que cumple las funciones de terminal móvil, GPS y *scanner*. Cuyas características se detallan en la Tabla 2.3 (las especificaciones completas se encuentran en el **ANEXO-A**).

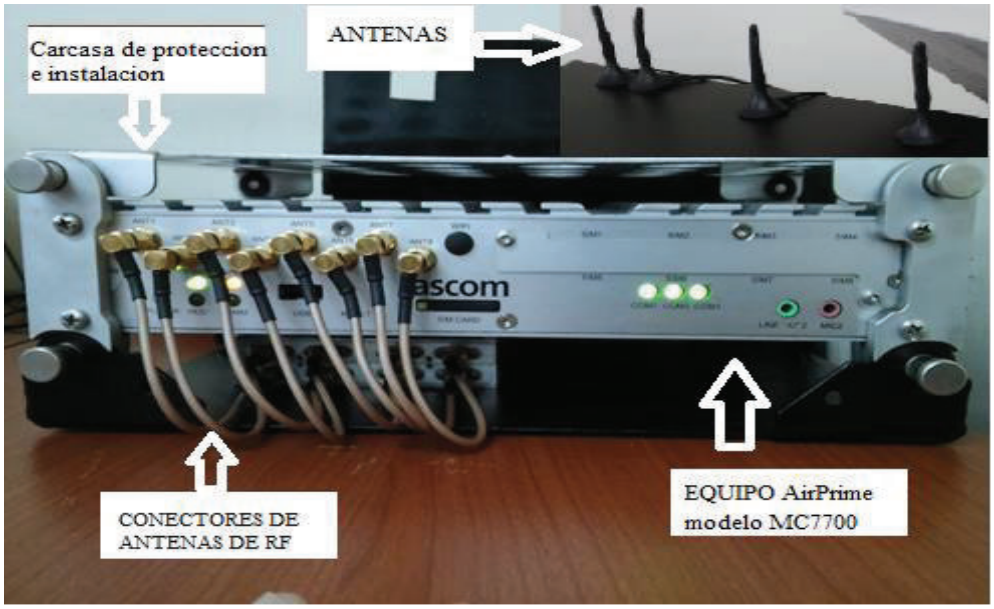

Figura 2.8 Sierra Wireless AirPrime modelo MC7700 Propiedad de ARCOTEL

Para la configuración del equipo de medición y recolección de datos, se ha utilizado el programa TEMS™ *Investigation*, de la compañía ASCOM ver Figura 2.9.

Este *software* tiene prestaciones para efectuar drive test y otras pruebas de rendimiento en redes móviles de las tecnologías 2G,3G y 4G. Actualmente la compañía ASCOM provee soluciones más portables como es la de TEMS POCKET, la cual se convierte en una aplicación para el *smartphone*, de buenas características, con el cual no se requiere de mayor equipamiento adicional más que el propio celular, ofrece mediciones en tiempo real de los parámetros de las redes disponible y que se encuentre conectado el terminal móvil, así también efectúa pruebas de rendimiento de la red, como carga y descarga de archivos, pruebas de conectividad y peticiones web, además de la recolección de datos.

Modelo	MC77xx
Interfaz aire	LTE,HSPA+,GSM/GPRS/EDGE,EV-DO Rev A (MC7750), 1xRTT (MC7750)
DATA SPEED	
Peak Download Rate	100 Mbps
Peak Upload Rate	50 Mbps
BANDAS DE FRECUENCIA	
LTE	MC7700: 2100(B1), AWS(B4), 700(B17) MC7710: 2100(B1), 1800(B3), 2600(B7), 900(B8), 800(B20) MC7750: 700(B13)
WCDMA	MC7700: 2100(B1), 1900(B2), 850(B5) MC7710: 2100(B1), 900(B8)
CDMA 1xRTT/EV-DO Rev A	MC7750: 800(BC0), 1900(BC1)
GSM/GPRS/EDGE	Quad-Band
INTERFACES	
USB	USB 2.0 High Speed
SIM interface	1.8 or 3V
ANTENA	
U.FL Antenna Connectors	3
Diversity	SI
MIMO	SI
GPS Bias	SI

Tabla 2.4 Características de Sierra Wireless AirPrime modelo MC7700

Para el procesamiento de la información se utilizará el *software* TEMS Investigation, el cual es una solución que permite realizar pruebas activas de extremo a extremo utilizado para verificar, optimizar y solucionar problemas de las redes y servicios desde una perspectiva de abonado para escenarios de prueba en vehículos, aplicable a sistemas en construcción o en producción. Proporciona la disponibilidad de realizar pruebas tempranas de nuevas tecnologías, características y dispositivos, con una constante actualización, a fin de satisfacer las necesidades en evolución durante las etapas pre y post lanzamiento de desarrollos de redes inalámbricas.

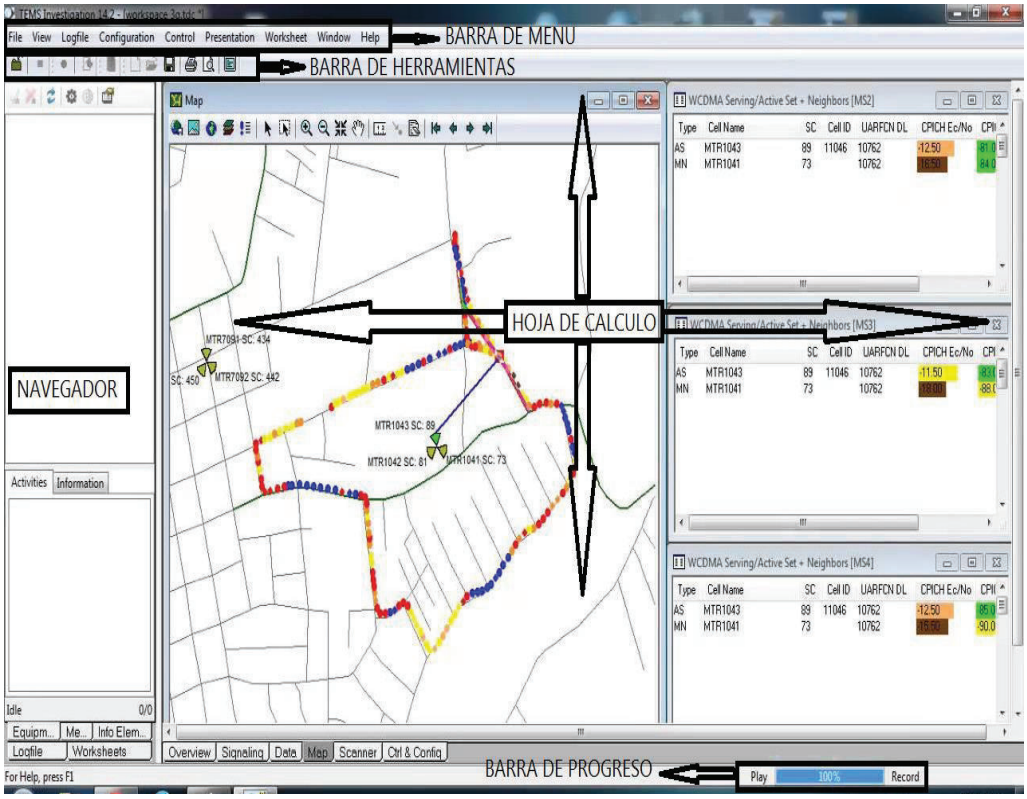

Figura 2.9 TEMS Investigation [34]

Como se mencionó anteriormente todos los componentes se encuentran instalados en un vehículo propiedad de la ARCOTEL, tal como se muestra en la Figura 2.10

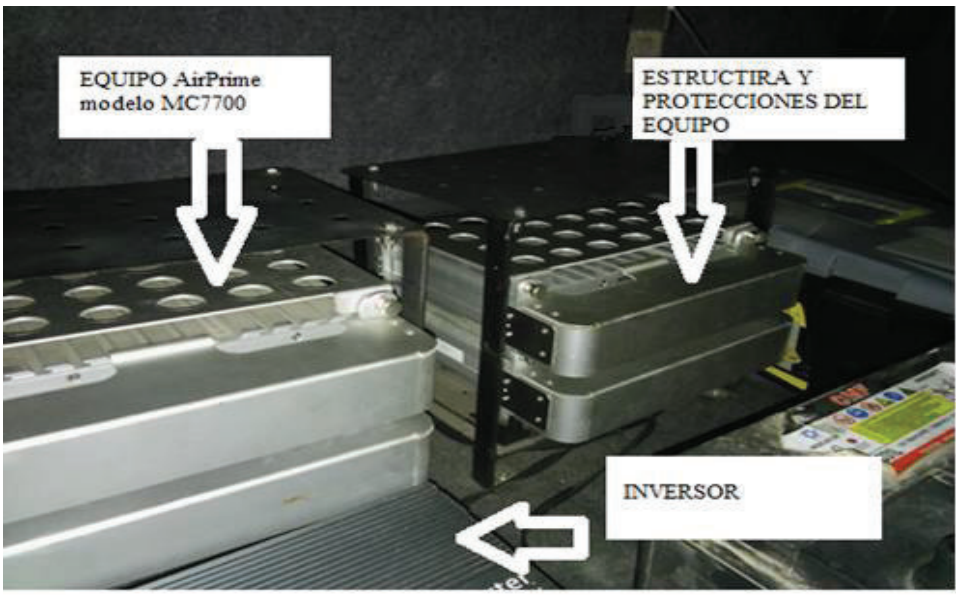

Figura 2.10 Equipamiento instalado en vehículo propiedad de la ARCOTEL

CAPÍTULO III: MEDICIÓN, RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS OBTENIDOS

El presente capítulo describe el procedimiento establecido para las mediciones de parámetros técnicos de calidad. Se detalla la metodología a seguir para efectuar las mediciones, y se presentan las configuraciones de los equipos a utilizarse durante la prueba. La configuración de los equipos estará enfocada a la obtención de parámetros de cobertura y pruebas de transferencia de datos como se detalla en el alcance del presente proyecto de titulación. En este capítulo además se realizará el procesamiento y análisis de resultados obtenidos. Al final de este capítulo se presentará una propuesta para la recomendación de parámetros de calidad del servicio móvil avanzado de LTE-A.

3.1 CONSIDERACIONES PARA LA TOMA DE MEDICIONES

En este apartado se indicarán los parámetros y se establecerá el escenario, así como los procedimientos con los cuales se realizarán las mediciones, considerando parámetros como horas de mayor tráfico de datos y ubicación de las estaciones, Adicionalmente se tomarán como referencia las recomendaciones establecidos por los organismos de estandarización.

3.1.1 Escenario de medición

El escenario en el que se efectuarán las mediciones, considera aspectos como la densidad de usuarios, nivel de carga de tráfico de datos en horas laborables, densidad de radio bases de las tres operadoras de SMA, días de la semana y horas a las cuales se efectuarán las pruebas.

Los operadores de SMA publican las respectivas zonas de cobertura en su página web, tal y como se establece en la resolución del CONATEL No. TEL-042-01-CONATEL-2014, como se muestra en la Figura 3.1 para el operador de SMA Corporación Nacional de Telecomunicaciones con nombre comercial CNT E.P. y la Figura 3.2 para el operador de SMA OTECEL S.A. con nombre comercial MOVISTAR, el operador de SMA CONECEL S.A. con nombre comercial CLARO presenta la información de cobertura en forma escrita y por zonas no detalladas, en el presente trabajo no se considera el estudio de la operadora virtual Twenty ya que no dispone de infraestructura física.

Como se puede ver en las Figuras 3.1 y la Figura 3.2 de las zonas publicadas por el operador de SMA CLARO, en el Distrito Metropolitano de Quito se verifica cobertura de la tecnología LTE-A 4G en la mayoría de la ciudad, lo que implica una adecuada densidad de radio bases. La selección se concentrará en el sector norte de la ciudad ya que abarca varios sectores comerciales.

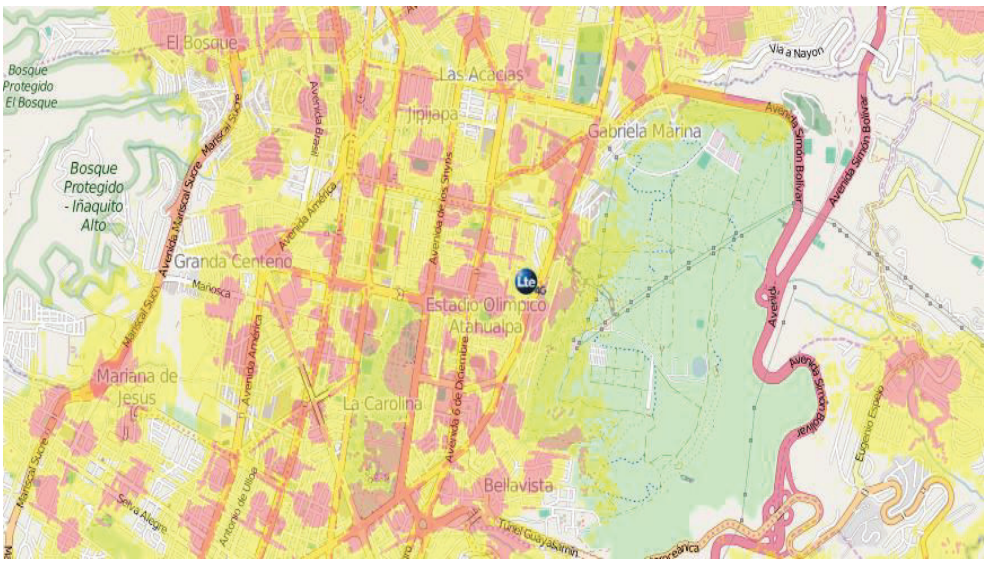

Figura 3.1 Cobertura anunciada por el operador de SMA CNT EP [35]

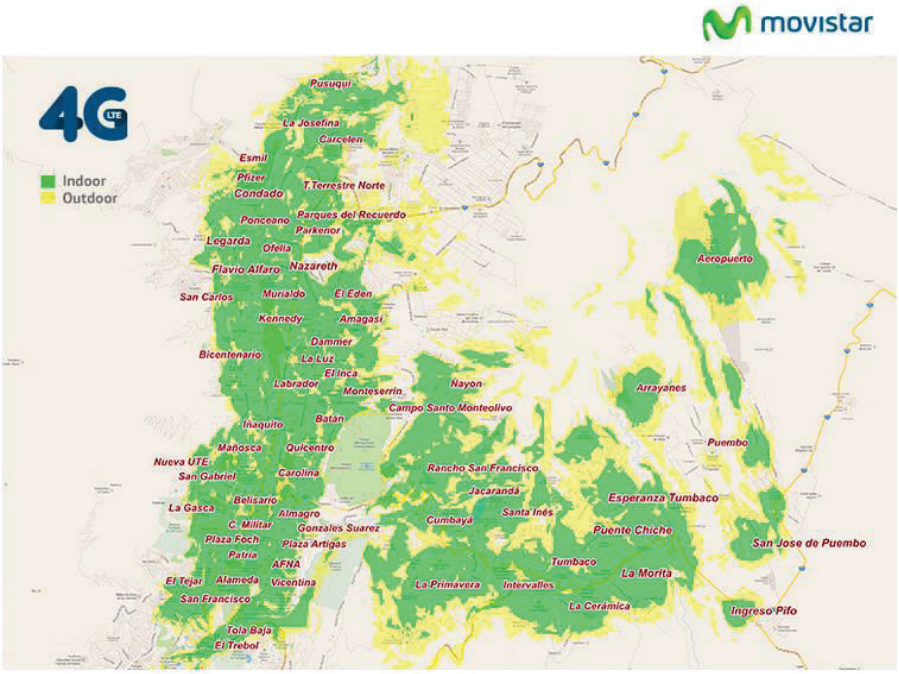

Figura 3.2 Cobertura anunciada por el operador de SMA MOVISTAR [36]

Se considera un escenario con las características más críticas, es decir, el análisis se realizará con una alta densidad de usuarios, en horas y días laborables, lo que implica altos niveles de tráfico en las redes LTE-A 4G. Por lo cual se revisa y ubica un polígono en base a la mayor cantidad de radio bases encontradas en la zona comercial de Quito, como se muestra en la Figura 3.3, ya que una mayor cantidad de radio bases implica mayor cantidad de usuarios. La ubicación de radio bases es información confidencial que cada proveedor de SMA proporciona únicamente a la ARCOTEL, por lo cual esta información se revisó, pero no se puede presentar en forma gráfica,

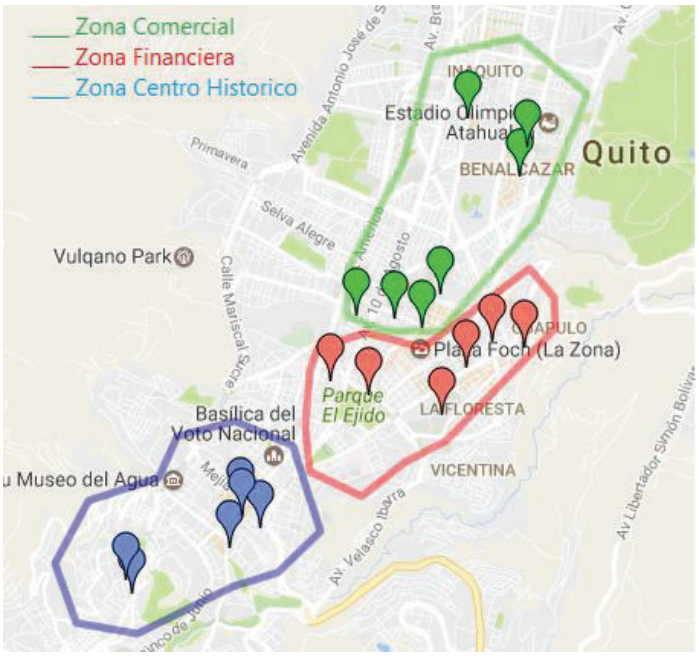

Figura 3.3 Zonas de la ciudad de Quito obtenida de Google Maps

Con esto en consideración, el sector comercial seleccionado para el presente trabajo es Iñaquito, debido a que presenta una densidad de 5 radio bases por cada operador de SMA (CNT, OTECEL y CONECEL), el mismo que se presenta en la Figura 3.4, en donde se puede apreciar además el polígono de medición sobre el cual se efectuaran las mediciones.

El polígono de medición[67] es la zona dentro de la cual se realizan las mediciones. En este caso se establece el polígono de medición limitado por las Avenidas: Av. de los Shyris, Av. Naciones Unidas, Av. 6 de diciembre y Av. General Eloy Alfaro, tal como se muestra en la Figura 3.4.

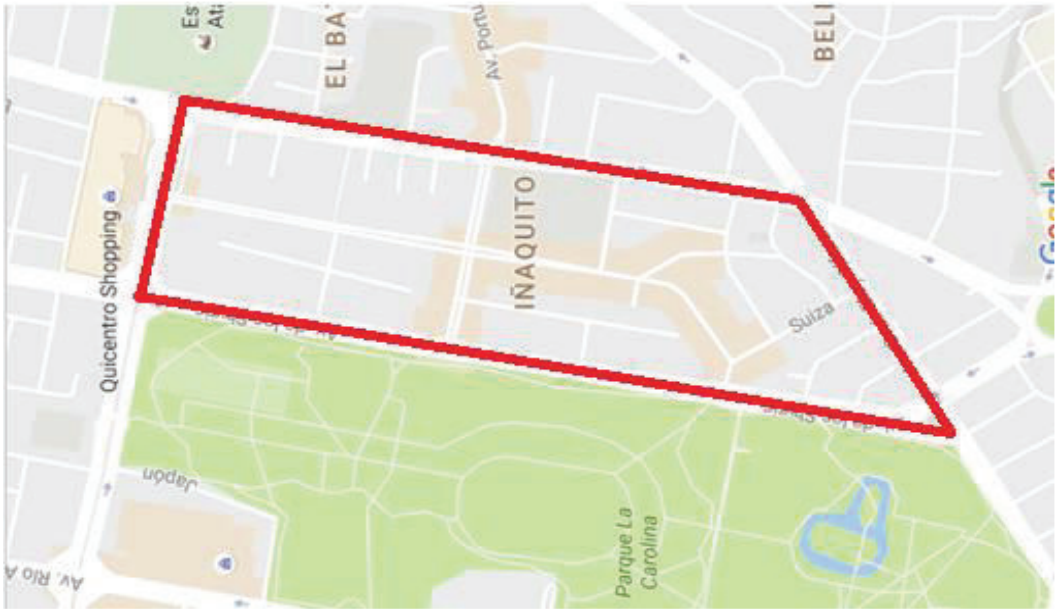

Figura 3.4 Polígono de medición sector Iñaquito.

Una vez establecido el escenario en el cual se efectuarán las pruebas se procede a establecer los procedimientos para la toma de mediciones.

3.1.2 Procedimiento de medición y recolección de datos [12]

Para esto se procede a revisar la recomendación del organismo de estandarización ETSI EG 202 057-4 v1.1.1 en la que se establecen mecanismos de medición relacionados a los parámetros de calidad en redes de acceso a Internet inalámbrico.

En la recomendación se detallan los parámetros de calidad de servicio y rendimiento en redes inalámbricas, además de procedimientos que permiten evaluar la calidad de conexión inalámbrica establecida en la red y que es percibida por el usuario.

[67] Polígono de medición: Zona geográfica delimitada, con el objetivo de realizar drive test o mediciones en puntos específicos.

El término acceso a Internet abarca el acceso físico entre el equipo del usuario y el acceso a la red IP la cual proporciona al usuario final el acceso a Internet. En la mencionada recomendación se plantean parámetros de calidad únicamente para la conexión entre el usuario y la red IP en términos de disponibilidad y fiabilidad de acceso.

Debido a que el acceso a Internet comprende el acceso a varias redes de datos dependiendo de a cuál de estas redes el usuario realiza la petición de información, no se considera que el operador de SMA sea responsable del rendimiento de redes de datos externas, por lo tanto, para el presente estudio se realizarán pruebas de peticiones a páginas web en la red del proveedor y páginas web de mayor acceso (según el *ranking* de la página web Alexa) por parte de los usuarios en Ecuador.

El procedimiento y parámetros establecidos en la recomendación EG 202 057-4 v1.1.1 son aplicables a cualquier tecnología de acceso a Internet inalámbrico, tales como WLAN, GSM, GPRS y UMTS, entre otras. En la recomendación se establece que las mediciones se efectuarán en ubicaciones fijas, considerando esto se establecen puntos de medición fijos dentro del polígono establecido anteriormente (ver sección 3.1.1), tal como se muestra en la Figura 3.5.

Como se aprecia en la Figura 3.5, los puntos seleccionados abarcan todo el polígono de medición previamente establecido, no obstante, es necesario aclarar que los puntos de medición pueden variar dependiendo de la disponibilidad para estacionar el vehículo en el que se encuentra instalados los equipos de medición.

Para efectuar la evaluación de los parámetros de calidad en la red LTE-A se plantean tres tipos de pruebas, mismas que se detallan a continuación:

1. Se realizan pruebas de conectividad ICMP[68], para evaluar el retardo que presenta la red a peticiones de acceso a páginas web.
2. Se realizan pruebas de peticiones y descarga de contenido web, a las páginas web más populares, para evaluar las velocidades de acceso a contenido web que los usuarios pueden alcanzar.

[68] ICMP (por sus siglas en inglés de Internet Control Message Protocol) es un sub protocolo de notificación y control de errores del Protocolo de Internet (IP).

3. Se procede a ejecutar pruebas de carga y descarga de datos desde y hacia un servidor FTP propiedad de la ARCOTEL, con lo que se evalúa las velocidades de carga y descarga disponibles para los usuarios con diferentes niveles de potencia y cobertura.

Figura 3.5 Puntos de medición estáticos dentro de polígono de medición.

Para la prueba de descarga de archivos, se evaluarán los siguientes tamaños de archivos: 42MBytes y 127MBytes, estos archivos se encuentran disponibles en el servidor FTP propiedad de la ARCOTEL, se emplean estos archivos con el objetivo de obtener datos suficientes para el análisis posterior, la selección de estos archivos se realizó con el criterio considerando velocidades teóricas y condiciones ideales.

Con el equipo de medición disponible se alcanzan velocidades de 100Mbits y 50Mbit/s para *uplink* y *downlink* respectivamente (ver sección 2.2.6), considerando que la información de señalización y control representa

aproximadamente el 15% (ver sección 1.5.3) del total de datos enviados, se calcula la velocidad de datos teórica máxima, tal como se muestra en la Ecuación 3.1.

$$Vtx(DL) = VTotaltx(DL) * \%Datos\ usuario \qquad \text{Ec (3.1)}$$

$$Vtx(DL) = 100Mbps * 0.85 = 85Mbps$$

Con lo que se tiene una velocidad teórica de 85Mbps y 42.5Mbps para *uplink* y *downlink* respectivamente, con estas velocidades se puede calcular el tiempo de carga y descarga de los archivos de forma teorica.

$$td(teorico) = \frac{tamaño\ en\ bits}{Vtx(DL)} \qquad \text{Ec (3.2)}$$

$$td(teorico) = \frac{127MBytes * \frac{8bits}{1Byte}}{85Mbit/s} = 11.95\ s$$

Con lo mencionado anteriormente se espera un tiempo promedio de descarga de 12 segundos para el archivo de 127MBytes y de 4 segundos para el archivo de 42MBytes.

Considerando que el *software* de medición genera una muestra en un rango entre 10 a 60 ms, tal y como se muestra en la Tabla 3.1 en la columna *Time*, entonces el tiempo de descarga de datos y el tiempo en que se toma una muestra se obtendrá el número de muestras en cada prueba, en la Ecuación 3.3 se muestra un ejemplo de este cálculo.

$$\#muestras = \frac{td(teorico)}{Tiempo\ por\ muestra} = \frac{12segundos}{60ms} = 200\ muestras \qquad \text{Ec (3.3)}$$

En la Tabla 3.1 se muestra un ejemplo de los datos obtenidos durante las pruebas de carga y descarga de archivos, esto producto de pruebas preliminares efectuadas a fin de probar las configuraciones realizadas en el equipo de medición, en la Tabla 3.1 se encuentran 6 columnas, la columna *Time* se registra el tiempo en el cual se tomó la muestra, en la columna *Date* se registra la fecha de la medición, las columnas de *Latitude* y *Longitude* registran la ubicación en la

cual se tomaron los datos, y finalmente en las dos últimas columnas se presenta los parámetros de cobertura RSRP y RSRQ obtenidos.

Time	Date	Latitude	Longitude	RSRP	RSRQ
11:15:08.198	6/13/2016	0,1884848	78,4823303	-77,90	-10,10
11:15:08.208	6/13/2016	0,1884848	78,4823303	-78	-6,90
11:15:08.219	6/13/2016	0,1884848	78,4823303	-78,19	-8,5
11:15:08.329	6/13/2016	0,1884848	78,4823303	-77,90	-6,80
11:15:08.331	6/13/2016	0,1884848	78,4823303	-77,90	-10,60
11:15:08.391	6/13/2016	0,1884848	78,4823303	-78,09	-8,60
11:15:08.432	6/13/2016	0,1884848	78,4823303	-78,40	-7,80
11:15:08.442	6/13/2016	0,1884848	78,4823303	-78,40	-6,90

Tabla 3.1 Muestra aleatoria tomada con instrumentos de medición.

En conclusión, con un archivo de 127MBytes se obtendrán 200 muestras en un escenario ideal, es decir que la velocidad sea constante, la transmisión se efectúe sin errores y no se tenga presente mucho tráfico en la red, ya que si se incrementa el tiempo de descarga del archivo se dispondrá de más información para el análisis.

3.2 PROCEDIMIENTO EFECTUADO PARA LA TOMA DE MEDICIONES.

Respecto a la toma de mediciones, se realizó de forma preliminar un *drive test* del polígono presentado anteriormente en la sección 3.1.1 en la Figura 3.4, esto con el objetivo de obtener niveles de cobertura de las operadoras de SMA CNT, Movistar y Claro. A través de este procedimiento se verificaron las coberturas publicadas por parte de los operadores de SMA en sus respectivas páginas web y adicionalmente se procedió a clasificar los puntos de medición de acuerdo al nivel de cobertura presente en cada uno de ellos, se obtuvieron valores de RSRP y RSRQ, mismos que se presentan en forma gráfica en la Figura 3.6.

Cabe recalcar que los colores establecidos en el mapa no reflejan los niveles que este trabajo pretende recomendar ya que son valores por defecto que el

software de procesamiento TEMS DISCOVERY presenta, el cual se revisara más adelante.

Una vez establecidos los rangos de los niveles de cobertura que permitan garantizar calidad de servicio, la ARCOTEL procederá a configurar los mismos en los equipos de medición para que se muestren valores de los parámetros de cobertura en función de la calidad de servicio.

Posteriormente, se procedió con la medición de los parámetros de calidad de la red LTE-A en los puntos fijos distribuidos en la zona de medición (ver sección 3.1.2).

En cada punto de medición se procedió a realizar una prueba de carga y descarga de archivos, una prueba de petición de acceso a páginas web y una prueba de conectividad a un servidor web, por cada uno de los operadores de SMA.

En la Figura 3.7 se presentan los puntos en los cuales se realizaron las pruebas de conectividad (PING), pruebas de acceso a páginas WEB mediante el protocolo HTTP y pruebas de carga y descarga de archivos al servidor FTP,

Una vez concluidas las mediciones, se obtiene como resultado los archivos con extensión **.trp** propios del equipo de medición, dichos archivos contienen la información recolectada por el terminal móvil dependiendo de las pruebas realizadas. Para cada punto y operadora se obtuvieron dos archivos uno de conectividad y acceso a páginas WEB, y otro archivo que contiene información de las pruebas de carga y descarga de datos, junto con información técnica recolectada por el equipo de medición, con la cual se realizará el análisis posterior.

Para el procesamiento de la informacion se utiliza el *software* TEMS DISCOVERY version 10.0.7 (ver seccion 2.2.6), el cual cuenta con licencias para el procesamiento de información recolectada durante las mediciones realizadas en redes con tecnologia LTE-A, se utiliza este *software* debido a la disponibilidad del mismo en ARCOTEL.

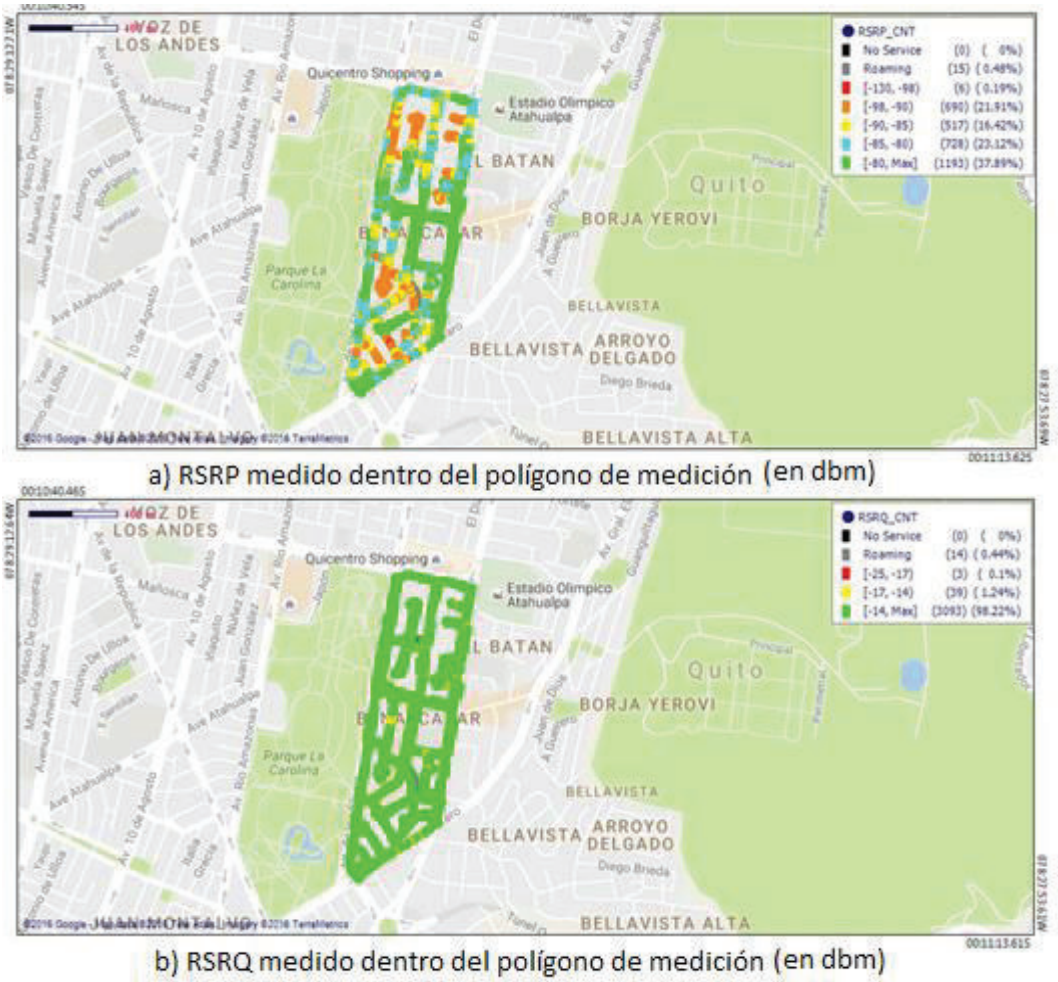

Figura 3.6 Valores de cobertura en el polígono de medición

Figura 3.7 Ubicaciones de las mediciones efectuadas, obtenidos de la App Orux Maps

3.3 PROCESAMIENTO DE DATOS [37][38]

El *software* TEMS DISCOVERY tiene opciones para la presentacion de resultados ya sean estos en forma de tablas de datos, gráficas de niveles sobre mapas o informes personalizables. Para el procesamiento de la información se deben seguir los pasos descritos a continuación:

- Al ingresar al programa se presenta la interfaz gráfica, tal y como se muestra en la Figura 3.8, para realizar el procesamiento de información se ingresa en la opción **Import Drive Test Data**, la cual se encuentra en la pestaña **File** y luego en la opción **Import**, como se indica en la Figura 3.9.

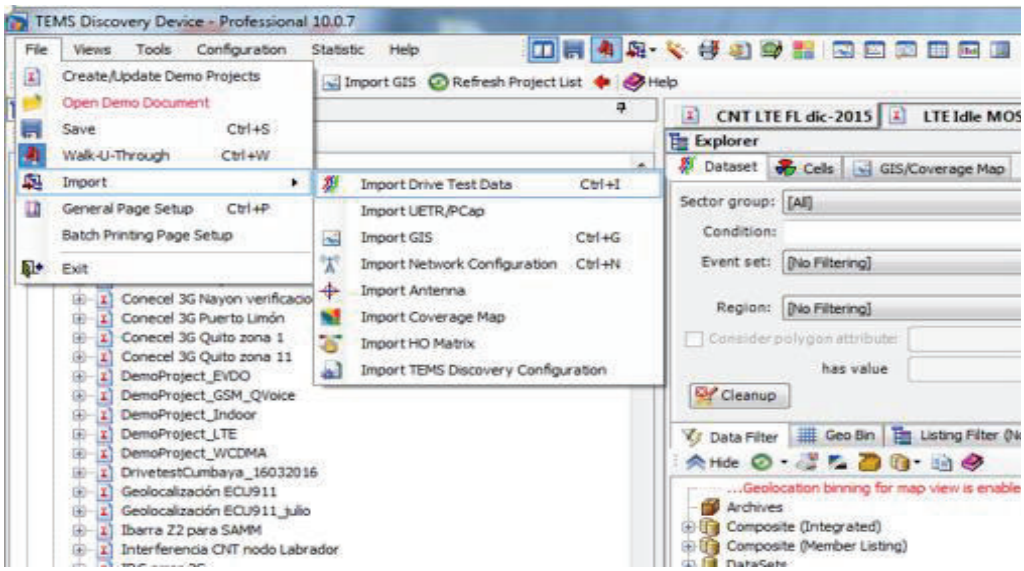

Figura 3.8 Software de procesamiento TEMS DISCOVERY V10.0.7[38]

- Se procede a seleccionar los archivos desde la opción **Select Data Format & Add File**. Es necesario asignar un nombre a los archivos de medición, para esto se usará un nombre con el tipo de información contenida y la fecha en la que se realizó la medición, todo esto desde la ventana que se muestra en la Figura 3.8.

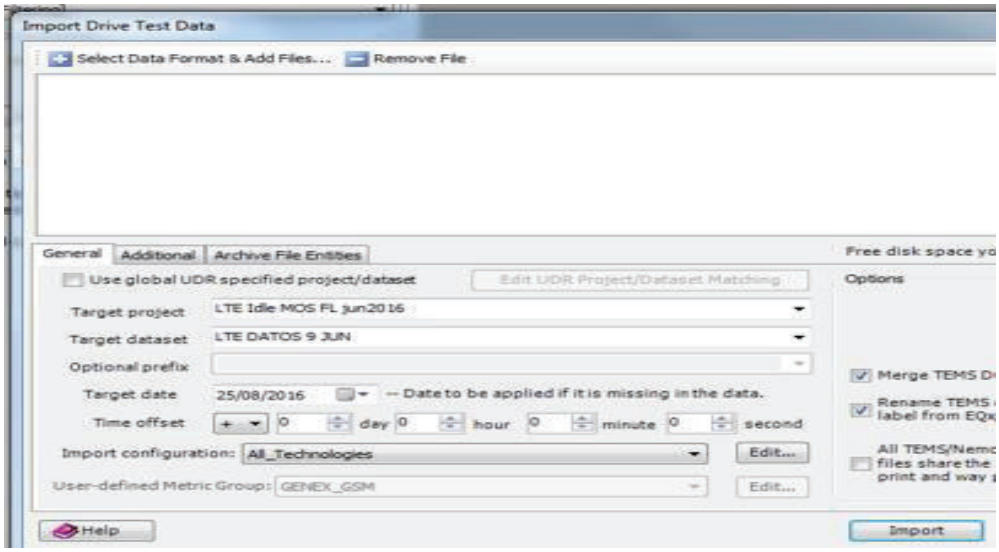

Figura 3.9 Selección de archivos para la importación de información.

La información procesada se mostrará con el nombre del archivo previamente asignado. En la Figura 3.10 se muestra toda la información recolectada agrupada por categoría en el explorador de datos.

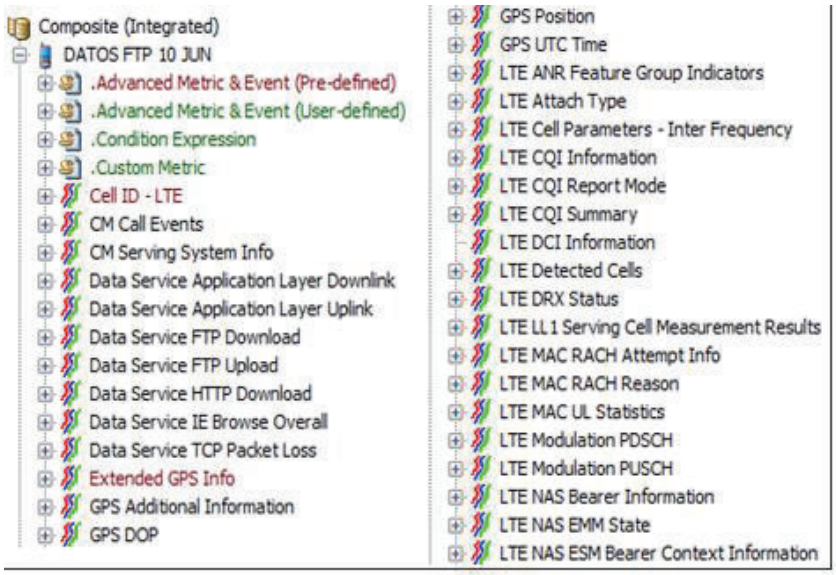

Figura 3.10 Información obtenida en las mediciones realizadas.

De toda la información se exportan los datos más relevantes para el estudio, los cuales son:

- Fecha y hora de la medición y la posición detectada por el GPS; con lo cual se puede identificar el lugar y el orden en el que los datos fueron obtenidos.
- Niveles de cobertura; con los cuales se compara el rendimiento de la red y así se determina cuál es el rango que permite una adecuada calidad de servicio a los usuarios de la red.
- Valores de Throughput obtenidos durante la prueba; se obtienen valores máximos, mínimos y promedios asociados a la cobertura en el punto de medición.
- Valores de latencia y velocidades de acceso a páginas web.
- Errores producidos durante la transmisión; los mismos que se encuentran representados por el porcentaje del BLER obtenido.

Para la presentación de la información el *software* TEMS DISCOVERY proporciona varias opciones, tal y como se muestra a continuacion:

- Presentacion en mapa: La vista de mapa es una pantalla de múltiples capas que puede mostrar múltiples conjuntos de datos, múltiples configuraciones de celda y múltiples sistemas de informacion geográfica (mapas) en la misma vista. Para mostrar datos en la vista de mapa, simplemente se arrastran los datos desde el explorador de datos y se coloca sobre la vista del mapa, en la Figura 3.11 se muestra un ejemplo de este tipo de presentación.

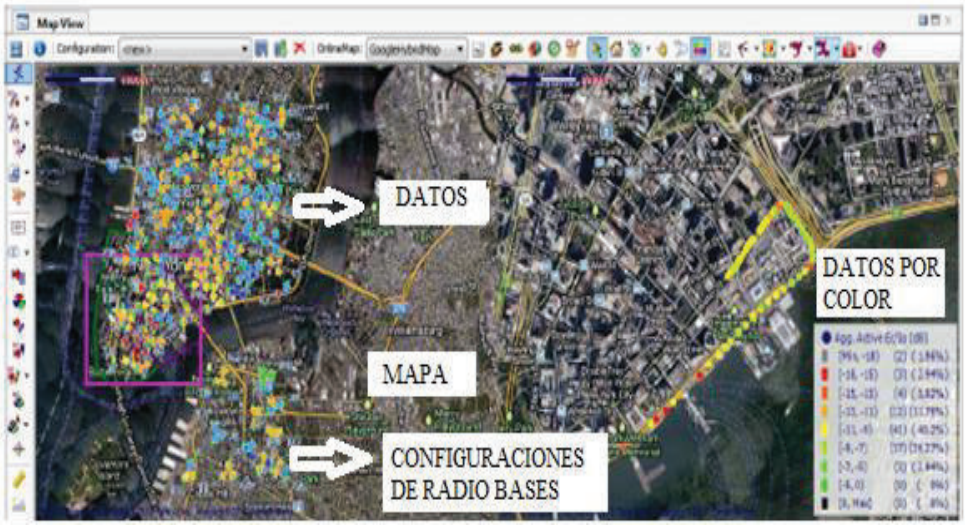

Figura 3.11 Presentacion en mapa en el sofware TEMS DISCOVERY [38]

- Presentación en gráfica de tiempo: En esta presentación se muestra cómo evolucionan los valores de los parámetros de radio a lo largo del tiempo. Se pueden trazar varios parámetros en el mismo gráfico para permitir una inspección rápida de la correlación de parámetros, en la Figura 3.12 se muestra un ejemplo.

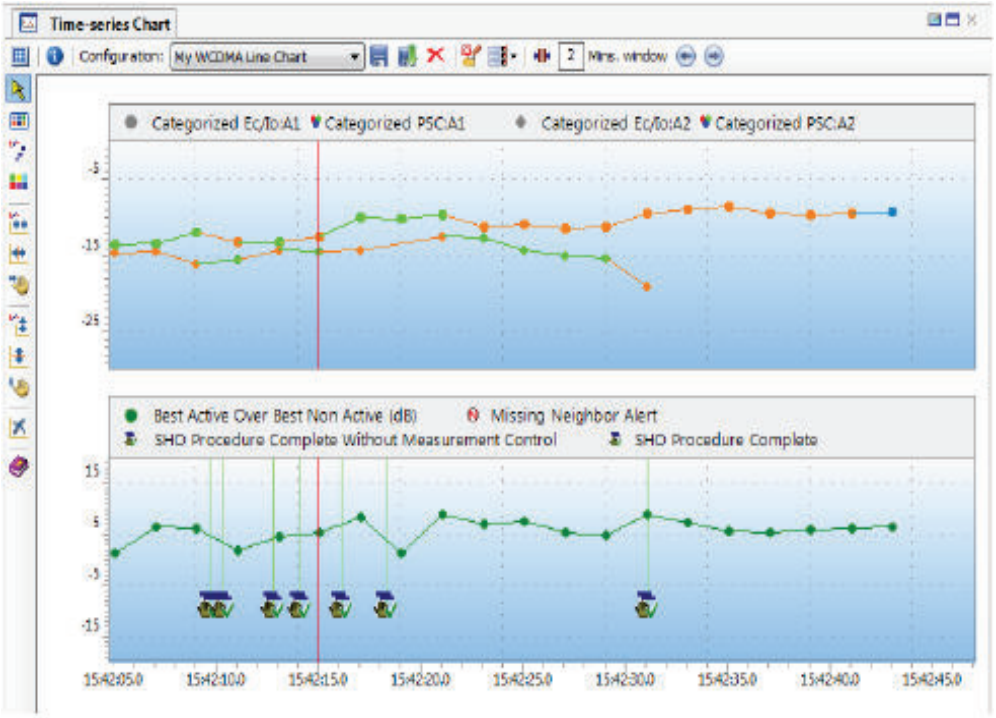

Figura 3.12 Presentacion en gráfica de tiempo en el sofware TEMS DISCOVERY [38]

- Presentación de mensajes: Contiene dos paneles. El panel izquierdo es una hoja de cálculo que enumera los mensajes en secuencia temporal y el panel derecho muestra información detallada del mensaje seleccionado a la izquierda, tal y como se muestra como ejemplo en la Figura 3.13.
- Presentación en tabla: Proporciona una visualización tabular de múltiples métricas y eventos, además la presentación en tabla también puede mostrar un informe estadístico de las métricas seleccionadas, y los datos se pueden exportar a Excel o MapInfo[69] MID / MIF. En la Figura 3.14 se muestra un ejemplo de esta presentación.

[69] MapInfo es un software de información geográfica (GIS), utilizado para el análisis de mapas y localizaciones.

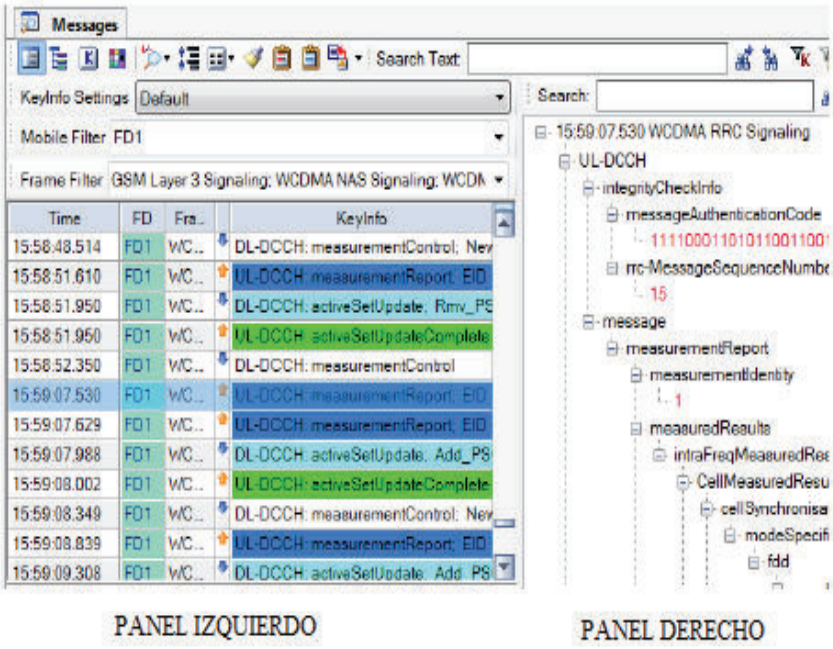

Figura 3.13 Presentacion de mensajes en el sofware TEMS DISCOVERY [38]

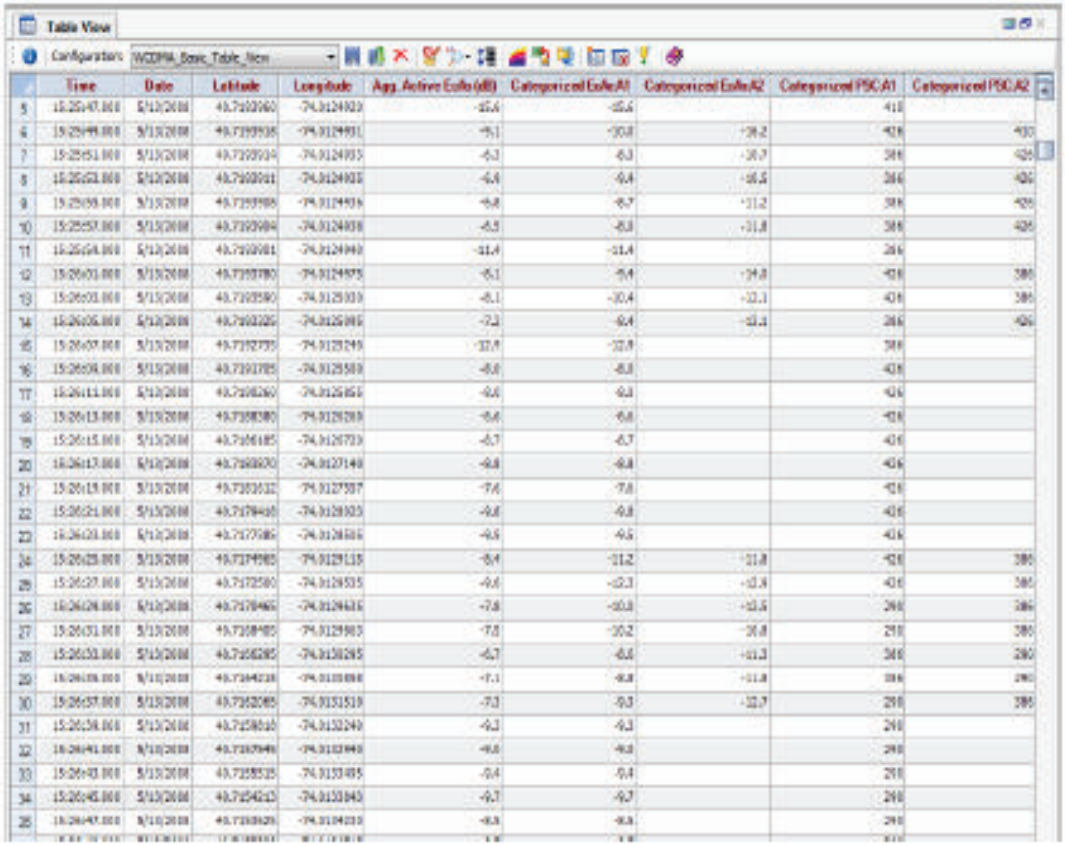

Figura 3.14 Presentación en tabla en el sofware TEMS DISCOVERY [38]

De las diversas opciones se procede a realizar el procesamiento de la información mediante la presentación en tabla, debido a que permite ordenar, graficar y comparar los datos de una forma mas versátil en el *software* Microsoft Excel. Toda la información recolectada, procesada e importada se presentará como Anexo-B en forma digital.

3.4 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como resultado de las pruebas realizadas y el procesamiento de la informacion obtenida durante las mismas, se obtuvo un informe de calidad mediante el *software* de procesamiento TEMS DISCOVERY, con este informe se comienza el analisis de los resultados.

En la Tabla 3.2 se presenta el informe de calidad obtenido de las pruebas realizadas, en el cual se observa el resumen de las metricas principales que tiene valores de cobertura promedio, maximo, minimo y numero de muestras tomadas, de la celda que proporciona el servicio y primera celda vecina, ademas informacion de diferencia de potencia entre la celda servidora - celda vecina del valor de RSRP y valor de potencia de transmision del UE.

Ademas en laTabla 3.2 se presenta indicadores de rendimiento en el cual se encuentran valores de *Througput* del PDSCH (enlace de *up* y *down*), RLC (enlace de *up* y *down*) y el BLER del canal PDSCH, tambien se encuentra un resumen estadistico de los valores de cobretura CINR, RSRP y RSRQ.

En el resumen estadistico se presenta las funsion de densidad de probabilidad (PDF[70]) y funcion de distribucion acumulada (CDF[71]) de los vaores de cobertura antes mencionados para cuatro rangos de valores posibles.

La información recolectada en todos los puntos de medición será presentada de forma conjunta en una gráfica, con el objetivo de obtener resultados independientes de la ubicación. Debido a la cantidad de información recolectada se dividirá la misma en tres partes, por cada parametro. Para realizar esta división se tomará el valor máximo y mínimo de los parámetros de cobertura

[70] PDF: Representa la probabilidad de que una variable aleatoria caiga en una región especifica del espacio de probabilidades.
[71] CDF: Determina la probabilidad de que una variable aleatoria sea menor, mayor este entre dos valores.

obtenidos y se establecerán rangos simétricos de valores, con el objetivo de realizar un mejor análisis de la información.

Resumen de las principales métricas				
Métricas	# Muestras	Promedio	Min.	Max.
Radio Frecuencia				
RSRQ de la mejor celda (dB)	154211	-8,37	-26,5	-3,9
RS SNR celda servidora (dB)	106670	15,0425	-8,2	30
RSSI celda servidora (dBm)	106670	-61,21	-86,2	-34,8
RSRP celda servidora (dBm)	153131	-90,0925	-115,9	-62,8
RSRQ celda servidora (dB)	153131	-8,3425	-20	-3,9
RSSI celda vecina (dBm): N1	551	-76,8925	-89,8	-55,4
RSRP celda vecina (dBm): N1	47484	-97,2125	-125,1	-69,9
RSRQ celda vecina (dB): N1	47218	-13,8525	-29,4	-4,9
RSRP servidora a vecina (dB)	46376	6,6475	-10,2	27,9
CQI ancho de banda	198579	10,8	4	15
UE Poder TX (dBm)	54994	0,75	-40,1	23
Indicadores de Rendimiento				
PDSCH Throughput físico (kbps)	57560	15651,39	0	51960
PUSCH Throughput físico (kbps)	135176	1666,3775	0	14916
PDSCH BLER (%)	55910	10,235	0	100
RLC Throughput DL (kbps)	5957	326,6175	0	48384,7
RLC Throughput UL (kbps)	5336	437,3825	0	14581,98

Resumen estadístico de las métricas principales			
	Rango	PDF %	CDF %
RS-CINR Distribución	[Min, 0)	0,44333333	0,44333333
	[0, 13)	34,6533333	35,09
	[13, 20)	42,8166667	77,9066667
	[20, Max]	22,0933333	100
RSRP Distribución	Sin servicio	13,235	13,235
	[-100, -90)	49,8675	63,105
	[-90, -80)	16,45	79,5525
	[-80, Max]	20,4475	100
RSRQ Distribución	Sin servicio	0	0
	[-20, -15)	0,3	0,3
	[-15, -10)	19,3525	19,6525
	[-10, Max]	80,3475	100

Tabla 3.2 Informe tecnico de calidad obtenido.

3.4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se analizarán los niveles de cobertura obtenidos y se determinará el valor mínimo que permita a los usuarios obtener velocidades acordes a la tecnología LTE-A 4G. Primero se analizará la cobertura con relación

a las velocidades obtenidas durante las pruebas de descarga de archivos, después se analizaran los valores de tiempos de carga de páginas web, el análisis de los resultados fueron presentados al Ing. Diego Naranjo, funcionario de la ARCOTEL con 9 años de experiencia, para un análisis con mayor respaldo en el campo del control de redes celulares.

3.4.1.1 PRUEBAS DE CARGA Y DESCARGA DE ARCHIVOS DEL SERVIDOR FTP

3.4.1.2 Parámetro de cobertura RSRP

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos durante las pruebas de carga y descarga de datos, relacionados al parámetro de cobertura RSRP, con el objetivo de determinar los valores mínimos que se deben cumplir para garantizar a los usuarios las velocidades conforme a la tecnología LTE-A y por consiguiente la calidad de servicio que los usuarios reciben.

3.4.1.2.1 Análisis de resultados en el enlace de bajada

El resultado de las pruebas de descarga de archivos se presenta en la Figura 3.15, en la cual se comparan el parámetro de cobertura RSRP y la velocidad de datos obtenida en las pruebas de descarga de archivos.

En la Figura 3.15 se observa que las velocidades de datos máximas alcanzadas durante las pruebas son de más de 50 Mbps, también es claro que conforme disminuye el nivel del parámetro RSRP las velocidades máximas alcanzables son menores e incluso se reducen drásticamente a partir de los -100 dBm.

Para efectuar un análisis más detallado y determinar cuál es un valor adecuado del parámetro de cobertura RSRP que permita garantizar calidad de servicio se analizarán los valores inferiores a -100 dBm, a partir del cual las velocidades de datos disminuyen como ya se mencionó anteriormente.

En la Figura 3.15 se puede observar que los valores de Throughput sufren altas variaciones, esto se debe a la naturaleza del trafico, en este caso, no se garantiza una velocidad constante (ver seccion 2.2.2.1).

Como se puede ver en la Figura 3.16, con valores de cobertura entre -100 a -103 dBm es posible obtener velocidades de datos de hasta 40Mbps, también se

observa que a partir de los -104dBm se obtienen velocidades de hasta 10Mbps, lo que representa una disminución en la velocidad de datos del 75%, en base a estos valores, se recomienda que los operadores de SMA garanticen un nivel de cobertura mínima en el parámetro de cobertura RSRP de -103 dBm, deacuerdo a los datos obtenidos en el enlace de bajada.

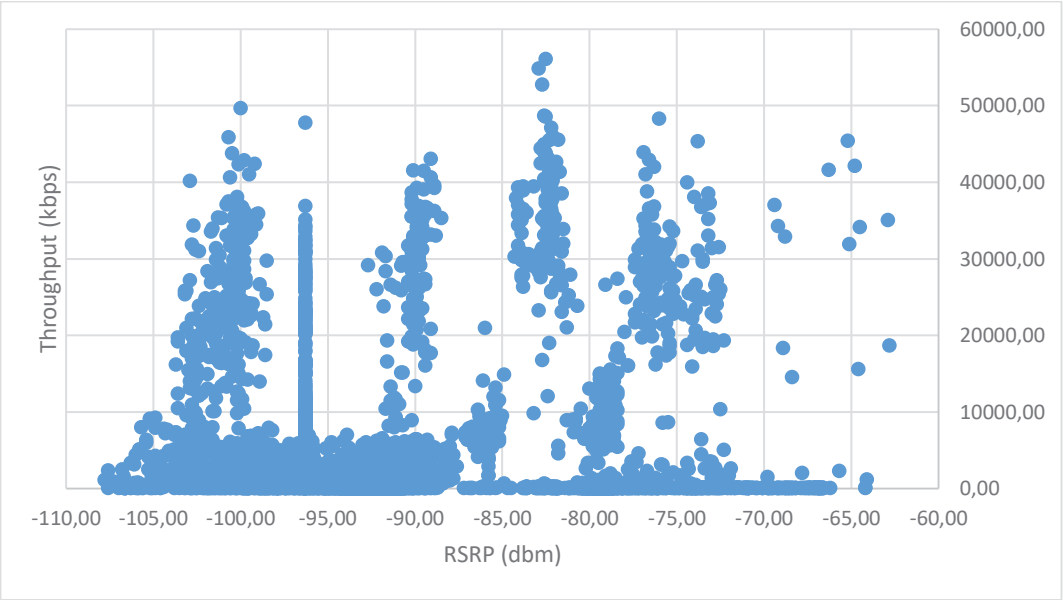

Figura 3.15 RSRP vs THROUGHPUT DL

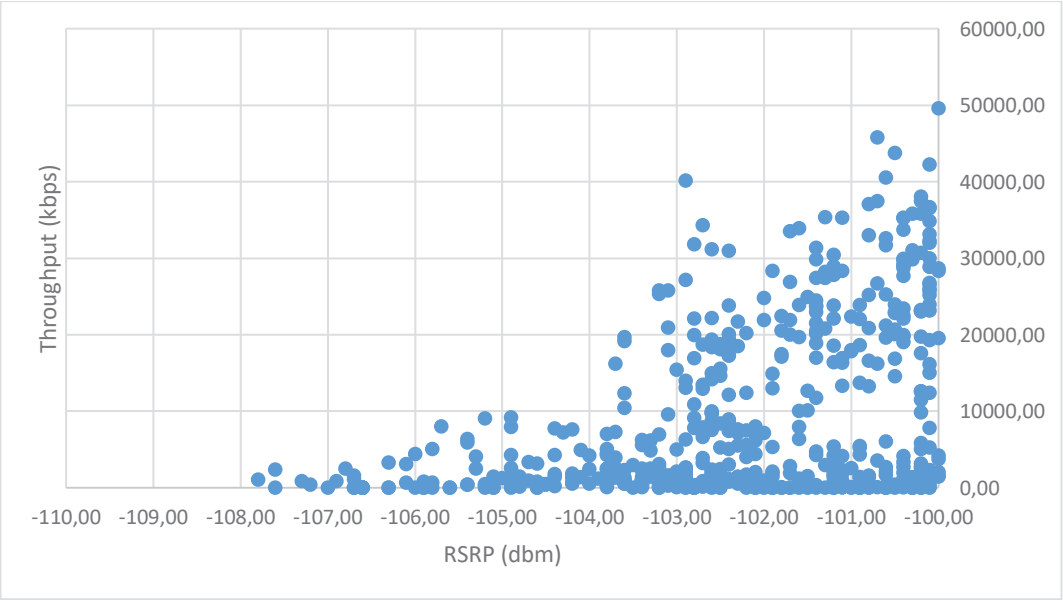

Figura 3.16 RSRP vs THROUGHPUT DL valores inferiores a -100 dbm

3.4.1.2.2 Análisis de resultados en el enlace de subida

El resultado de las pruebas de carga de archivos se presenta en la Figura 3.17, en la cual se comparan el parámetro de cobertura RSRP y la velocidad de datos obtenida de las pruebas de carga de archivos.

En la Figura 3.17 se observa que la velocidad de datos máxima alcanzada durante las pruebas es de 14 Mbps, también es claro que conforme disminuye el nivel del parámetro RSRP las velocidades máximas alcanzables son menores e incluso disminuyen drásticamente a partir de los -96 dBm.

Para efectuar un análisis más detallado y determinar cuál es un valor adecuado del parámetro de cobertura RSRP, el cual que permite garantizar calidad de servicio, se analizarán los valores inferiores a -96 dBm, a partir del cual las velocidades de datos disminuyen como ya se mencionó anteriormente.

En la Figura 3.18 se pueden observar los datos obtenidos a partir de los -96 dBm, en el valor de -96.3 dBm se obtienen valores de 10Mbps, mientras que si se observan valores a partir de los -99.5 dBm, los valores máximos alcanzables son de 4.5 Mbps, es decir la velocidad de datos sufre una disminución de aproximadamente el 50 %, razón por la cual se recomienda que se garantice un valor de cobertura mínimo de -96 dBm, a fin de garantizar adecuados niveles de velocidad para los usuarios.

Como conclusión de los resultados obtenidos y analizados en esta sección para obtener velocidades superiores a 40Mbps en el enlace descendente se requiere un valor mínimo del parámetro de cobertura RSRP de -103 dBm y en el enlace de subida se requiere un valor mínimo de RSRP de -96dBm para obtener velocidades de hasta 10Mbps.

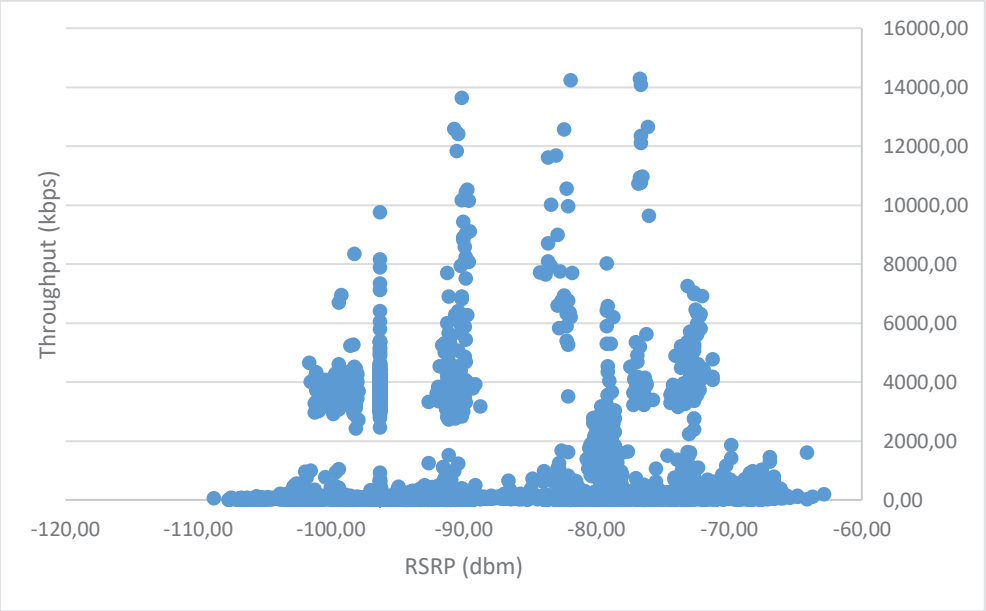

Figura 3.17 RSRP vs THROUGHPUT UL

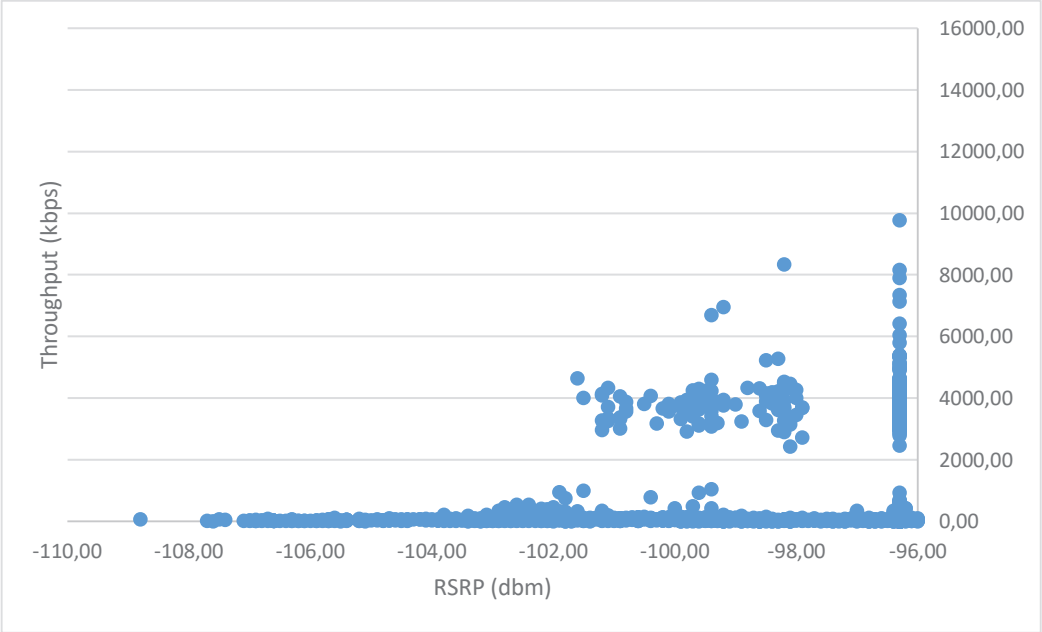

Figura 3.18 RSRP vs THROUGHPUT UL valores inferiores a -96 dbm

3.4.1.3 Parámetro de cobertura RSRQ

En esta sección se presentarán y analizarán los resultados obtenidos durante las pruebas de carga y descarga de datos, relacionados al parámetro de cobertura RSRQ, con el objetivo de determinar los valores mínimos que se deben cumplir para garantizar a los usuarios las velocidades en el enlace de subida y bajada

conforme a la tecnología LTE-A, y por consiguiente la calidad de servicio que los usuarios reciben.

3.4.1.3.1 Análisis de resultados en el enlace de bajada

El resultado de las pruebas de descarga de archivos se presenta en la Figura 3.19, en la cual se comparan el parámetro de cobertura RSRQ y la velocidad de datos obtenida de las pruebas de descarga de datos.

En la Figura 3.19 se observa que las velocidades de datos máximas alcanzadas durante las pruebas son de más de 50 Mbps, también es claro que conforme disminuye el nivel del parámetro RSRQ la velocidad máxima alcanzable es menor e incluso se reduce drásticamente a partir de los -11dBm.

Para efectuar un análisis más detallado y determinar cuál es un valor adecuado del parámetro de cobertura RSRQ que permita garantizar calidad de servicio se analizarán los valores inferiores a -11 dBm, punto a partir del cual la velocidad de datos disminuye como ya se mencionó anteriormente.

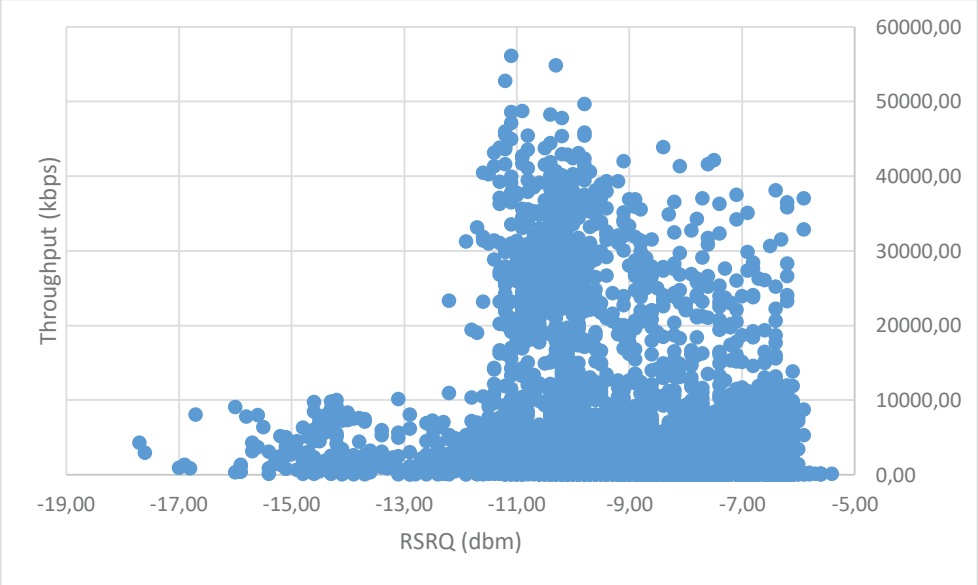

Figura 3.19 RSRQ vs THROUGHPUT DL

Como se puede ver en la Figura 3.20, con valores de cobertura de -11.5dBm se logran obtener velocidades de datos de hasta 40 Mbps valores mayores representan una disminución importante en la velocidad de datos. Para el valor de cobertura de -12.2 dBm se verifica que la velocidad de datos máxima es de 10 Mbps lo que implica una disminución de más del 75%.

Deacuerdo a los datos analizados, se recomienda que el parametro de cobertura RSRQ, sea de -11.5 dbm a fin de garantizar un servicio con calidad de servicio y acorde a la tecnologia LTE-A.

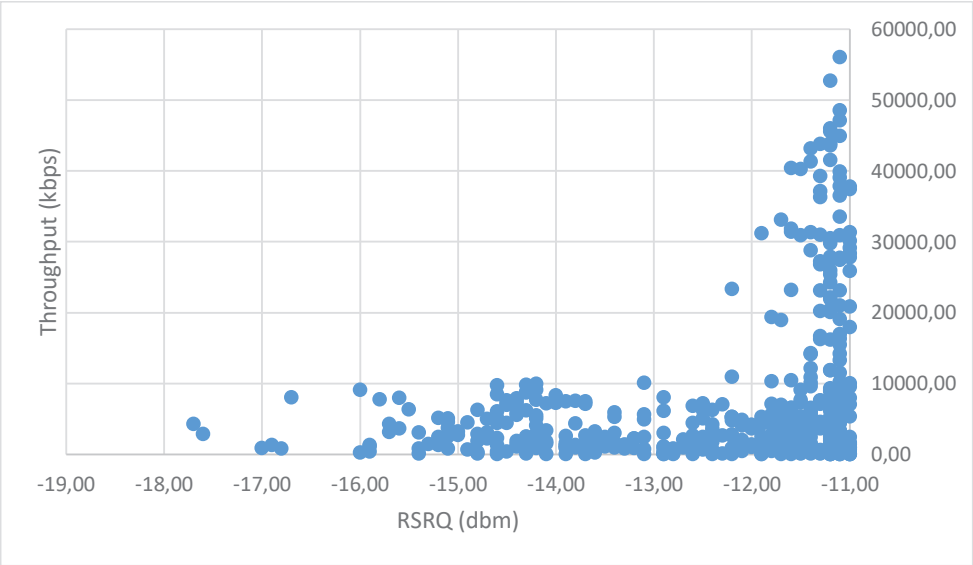

Figura 3.20 RSRQ vs THROUGHPUT DL valores inferiores a -11 dbm

3.4.1.3.2 Análisis de resultados en el enlace de subida

El resultado de las pruebas de carga de archivos se presenta en la Figura 3.21, en la cual se comparan el parámetro de cobertura RSRQ y la velocidad de datos obtenida de las pruebas de carga de archivos.

En la Figura 3.21 se observa que las velocidades de datos máximas alcanzadas durante las pruebas son de 14 Mbps, también es claro que conforme disminuye el nivel del parámetro RSRP las velocidades máximas alcanzables son menores e incluso disminuyen significativamente a partir de los -9.6 dbm.

Para efectuar un análisis más detallado y determinar cuál es un valor adecuado del parámetro de cobertura RSRQ que permita garantizar calidad de servicio se analizarán los valores inferiores a -9.6 dbm, en los cuales las velocidades de datos disminuyen como ya se mencionó anteriormente.

Como se puede ver en la Figura 3.22, con valores de cobertura de -9.6dbm se logra obtener velocidades de datos de 12 Mbps, se verifica una disminución importante de la velocidad de datos con valores menores, en el valor de cobertura de -10.6 dBm se verifica que la velocidad de datos maxima es de 4

Mbps lo que implica una disminución de más del 50%, por lo que se recomienda que el parámetro de cobertura RSRQ, según los datos analizados, sea de -9.6 dBm.

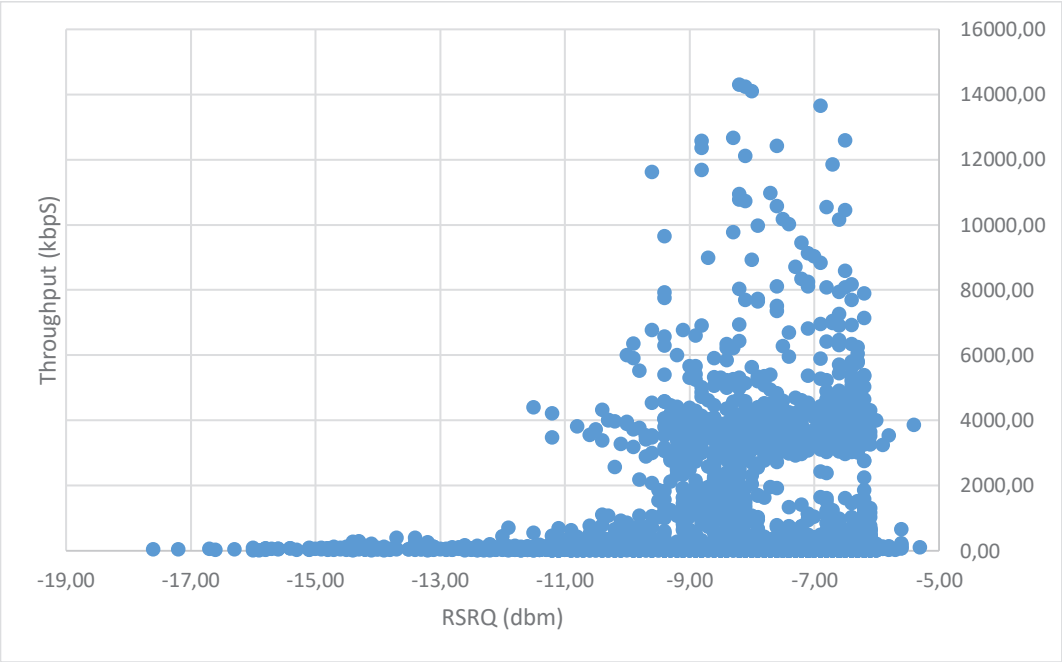

Figura 3.21 RSRQ vs THROUGHPUT UL

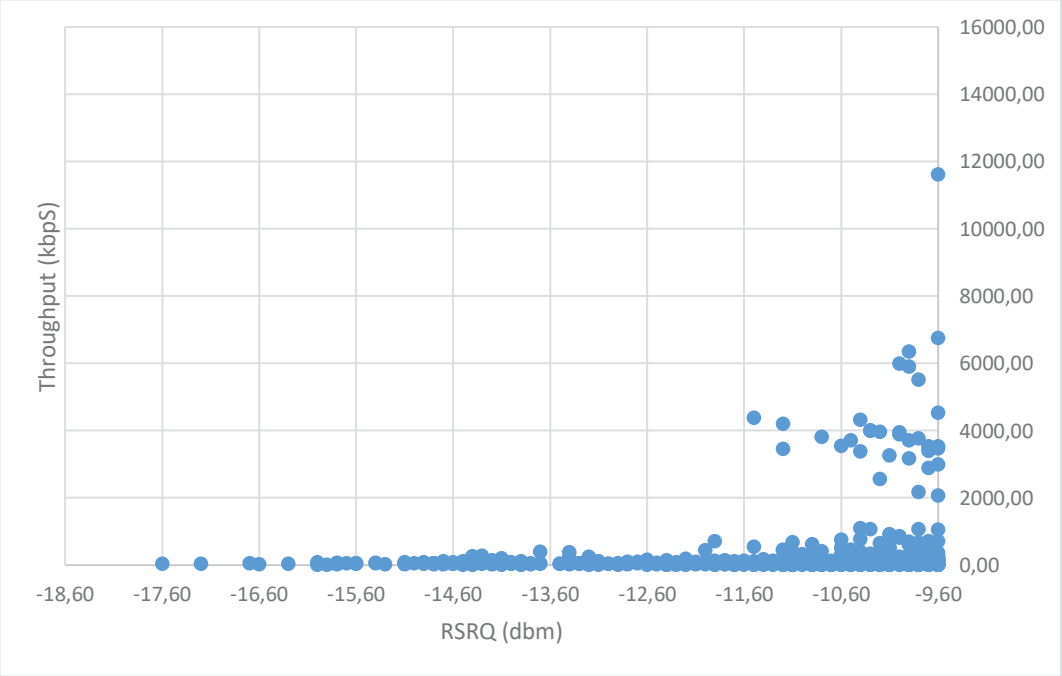

Figura 3.22 RSRQ vs THROUGHPUT UL valores inferiores a -11 dbm

Como conclusión, de los resultados obtenidos y analizados en esta sección, para obtener velocidades superiores a 40Mbps en el enlace descendente se requiere un valor mínimo del parámetro de cobertura RSRQ de -11.5 dbm y para el enlace de subida para obtener velocidades mayores a 10Mbits se requiere un valor mínimo de RSRQ de -9.6dbm.

3.4.1.4 PRUEBAS DE PETICIONES A PÁGINAS WEB

Las páginas web utilizadas para las pruebas son las más populares en el Ecuador, es decir se tiene mas accesos por parte de los usuarios, estas páginas fueron seleccionadas según la informacion disponible en la página web Alexa [39], tal y como se muestra en la Figura 3.22.

3.4.1.4.1 Resultados obtenidos en pruebas realizadas a páginas web

En las Figura 3.24 y Figura 3.25 se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en el acceso a páginas web, en las cuales se compara el tiempo de carga de la página web con los niveles de cobertura RSRP y RSRQ respectivamente.

En la Figura 3.24 se observa que conforme el parámetro de cobertura RSRP disminuye aumenta el tiempo de carga de las páginas web, también cabe mencionar que debido a que cada página web presenta un tamaño diferente, los tiempos de carga de cada una varía.

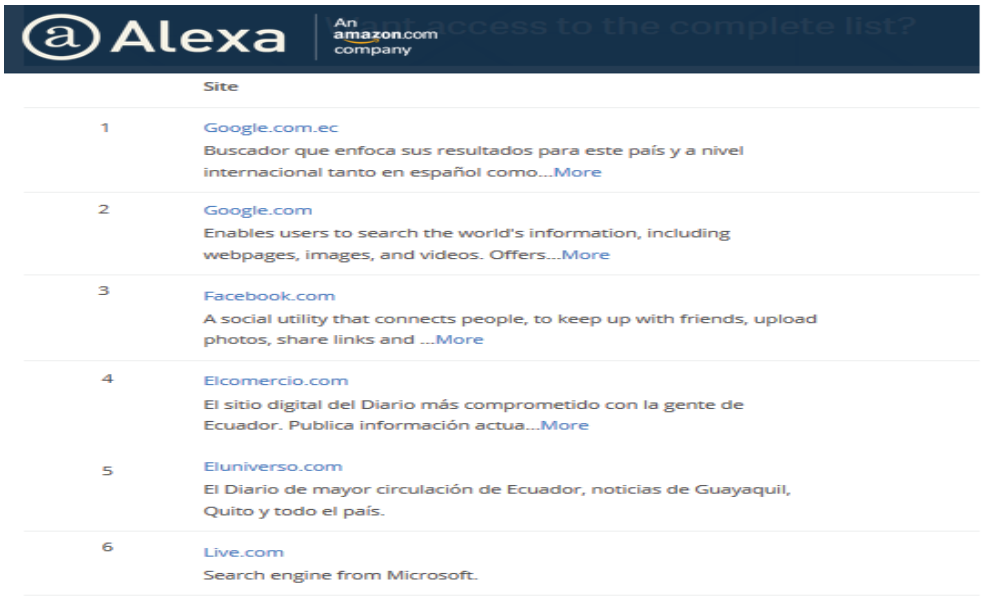

Figura 3.23 Top de páginas web en Ecuador [39]

De la información presentada en la Figura 3.24 se puede observar que el tiempo de carga de las páginas web se incrementa con mayor rapidez a partir de los -100 dBm de RSRP para las páginas web de El Comercio y El Universo. Esto debido a que son las páginas de mayor tamaño, el tiempo se incrementa alrededor de 2s para las páginas web de El Universo y 1s para El Comercio. En las páginas de Facebook, Google y Live debido a que son páginas de menor tamaño el incremento del tiempo de carga no es muy notorio.

En la Figura 3.23 se observa que con valores de cobertura de entre -69 a -100 dBm, se pueden obtener valores de tiempo de carga de hasta 12s sin embargo, también es posible obtener tiempos de carga de hasta 8s, esta variación del tiempo de carga de la página también obedece a factores propio del servidor web al que se está tratando de acceder, como por ejemplo, la cantidad de peticiones que el servidor web se encuentra atendiendo, la cantidad de recursos con los que cuenta, la optimización de los recursos usados en el diseño de la página web, entre otros.

En la Figura 3.24 se observa que a partir de los -100 dBm los valores mínimos de tiempo de carga son de 10s para la página web de El Comercio y de 11s para El Universo, y los valores máximos son de hasta 14s para El Universo y de 11.5s para El Comercio. Lo que da como resultado un incremento de tempo de carga de alrededor del 40% para la página de El Universo y del 20% para la página de El Comercio.

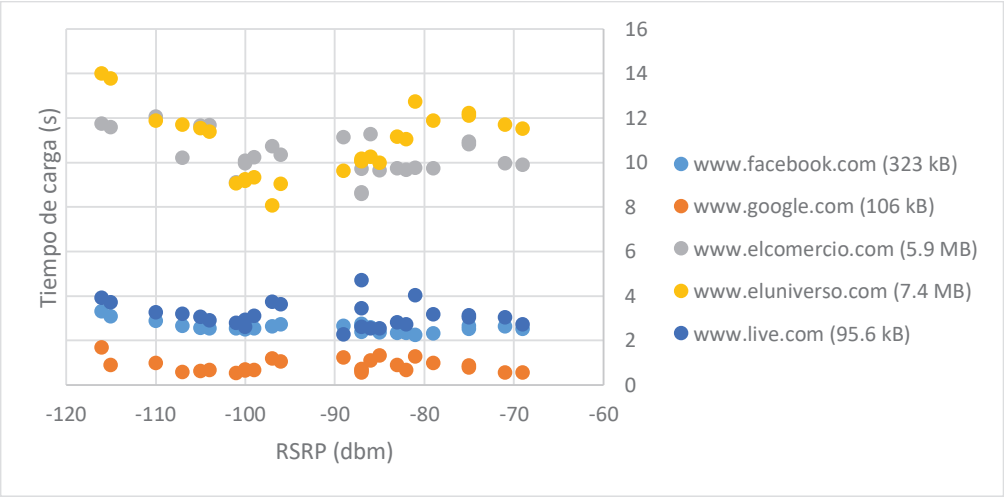

Figura 3.24 Tiempo de carga vs parámetro de cobertura RSRP

En la Figura 3.25 al igual que en la Figura 3.24 se mantiene la tendencia de incremento del tiempo de carga de las páginas web conforme diminuye el nivel de cobertura en este caso del parámetro RSRQ. Se observa que para valores en el rango entre -7 y -11 dBm se presentan tiempo de carga menores, mientras que para valores menores a -11 dBm los tiempos de carga se incrementan.

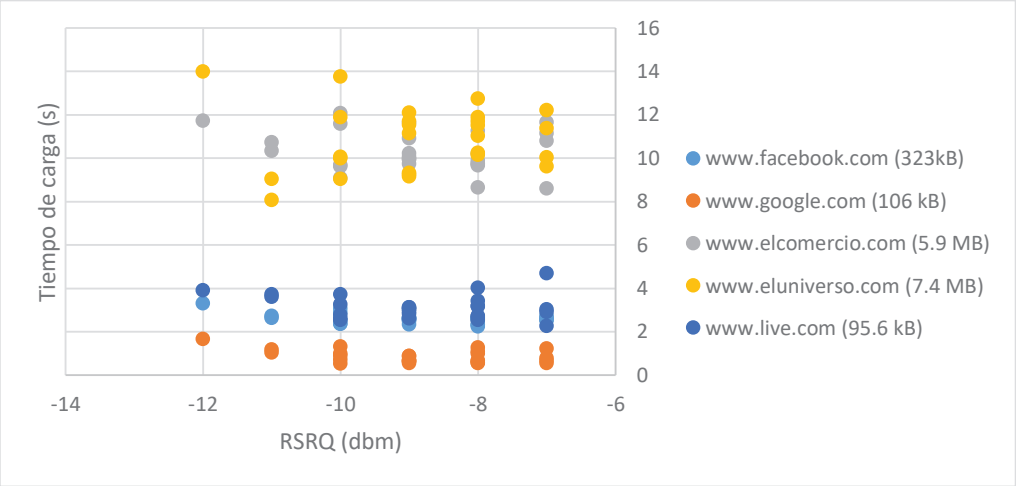

Figura 3.25 Tiempo de carga vs parámetro de cobertura RSRQ

3.4.1.4.2 Resultados obtenidos en pruebas de latencia

Las pruebas de latencia se realizaron a la página de mayor acceso y de menor tamaño, es decir a la página de google. A fin de garantizar que los tiempos de retardo en la red sean en su mayoría bajos y por consiguiente garantizar un servicio rápido y de calidad, desde el punto de vista del usuario, los tiempos de latencia deben ser los mínimos posibles. En la Figura 3.26 se puede observar que los valores de latencia son de hasta 200 ms, pero en la mayoría de los casos (pruebas) son menores, lo que implica un servicio sin mucho tiempo de espera.

En la Figura 3.26 también se puede observar pocos tiempos superiores a los 200ms. Estos tiempos pueden ser atribuidos a congestión en la red o a un alto número de peticiones realizadas por otros usuarios al servidor web, sin embargo, para mantener una adecuada QoS es necesario que no existan muchos casos en este escenario.

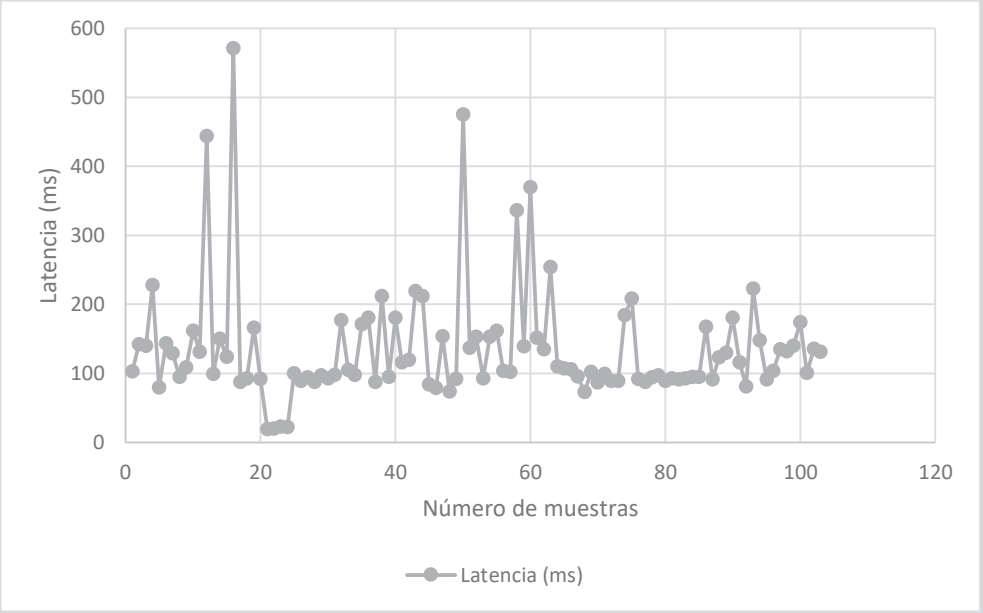

Figura 3.26 Latencia hacia el servidor web de Google

3.4.1.4.3 Resultados obtenidos en pruebas de BLER

Los valores de BLER obtenidos durante las pruebas de carga y descarga de datos se muestra en la Figura 3.27, aquí se observa una mayor densidad de muestras con BLER menor al 20% y una menor densidad de muestras con valores altos de BLER incluso llegando al 100 %; lo que implica que todos los bloques de datos llegaron con errores, esto puede deberse a bajos niveles de cobertura o interferencias en el radio enlace, con lo que la eficiencia en la transmision de datos se ve afectada.

Para obtener un porcentaje de BLER bajo, se debe incrementar la potencia en la red, sin embargo, esto implica una disminución de la capacidad de la red, debido a que la potencia es un recurso limitado. Por otra parte si el BLER es muy alto, implica que son necesarias muchas retransmisiones, lo que implica una degradación del servicio del usuario, por lo que el porcentaje de BLER debe establecerse considerando un equilibrio entre la QoS y capacidad de la red.

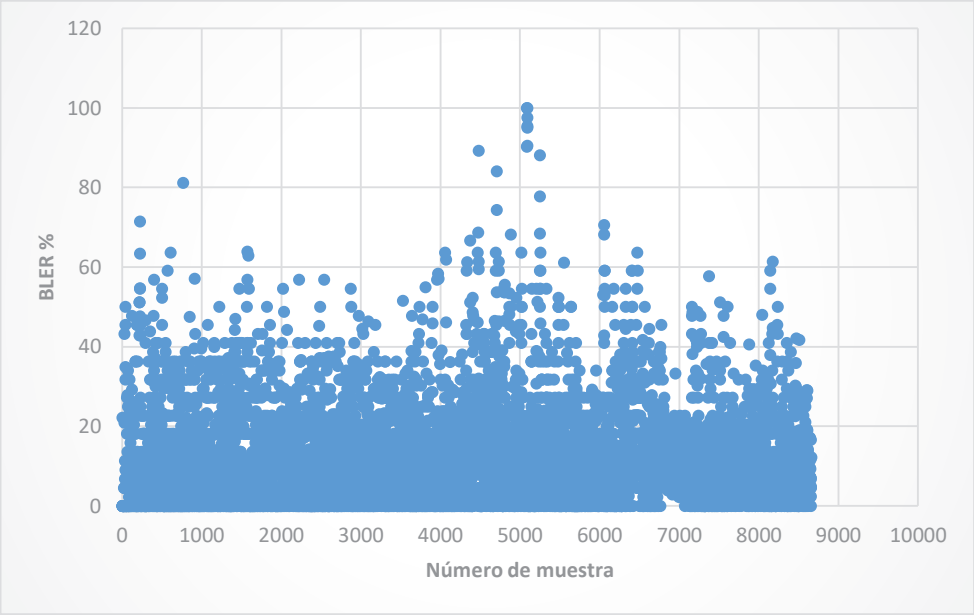

Figura 3.27 BLER obtenido en las pruebas de datos

3.4.2 RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En este apartado se procede a resumir la información analizada que servirá como base para las mediciones y control respectivo. Se sugiere que el control sea efectuado periódicamente por parte de la ARCOTEL, a fin de mantener la calidad en el servicio y realizar correcciones en caso de ser necesario en beneficio de los usuarios.

Esta información se plantea como una recomendación para la ARCOTEL, se resumen las actividades realizadas, así como procedimientos para las respectivas mediciones y demás consideraciones relacionadas con el control de calidad de servicio.

3.4.2.1 RECOMENDACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA ARCOTEL

3.4.2.1.1 Aspectos generales

La recomendación se realizó con la ayuda de la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones en la Coordinación Zonal #2, en base al presente estudio técnico, con el cual se pretende garantizar a los usuarios de la red LTE-A 4G una calidad de servicio acorde a la tecnología, el procedimiento realizado se detalla a continuación.

- Se realizó un estudio de la tecnología celular LTE y LTE A, de manera general se analizaron aspectos técnicos, enfocándose en la calidad de servicio que la red debe entregar.
- Se realizó un estudio del estado del arte de la calidad de servicio que las redes celulares 2G y 3G prestan actualmente en Ecuador, además se revisó la normativa de control que la ARCOTEL, implementa sobre los operadores de SMA que brindan servicios a través de estas tecnologías en el país.
- Con la información recopilada se procedió a seleccionar los parámetros técnicos que se analizarán y se realizó un estudio más detallado, a fin de determinar su influencia sobre la calidad de servicio y los métodos de medición que se pueden efectuar sobre los mismos.
- Se procedió a establecer una metodología de medición acorde a lo estudiado y conforme a los estándares establecidos por entidades internacionales como son la UIT y la ETSI.
- Se procedió a efectuar mediciones en una zona de alto tráfico del distrito metropolitano de la ciudad de Quito a fin de evaluar el peor de los escenarios, de esta forma garantizar la calidad de servicio en las demás zonas de la urbe.
- Se procesó la información recolectada en el proceso de medición, con el *software* Tems Discovery, proporcionado por la ARCOTEL. Se procesó la información de manera conjunta, sin diferenciar un operador de otro, para obtener datos únicamente orientados a la tecnología de estudio.
- La información procesada se exportó a tablas de Excel, programa con el cual se efectuaron gráficas, para realizar el análisis respectivo de los parámetros técnicos de interés.

3.4.2.1.2 Consideraciones previas a las mediciones en campo

Previo a la realización de las pruebas de campo se establecieron las siguientes consideraciones generales, con el principal objetivo de obtener mediciones acordes a una entidad de control como lo es la ARCOTEL, esto quiere decir, obtener resultados independientes de aspectos como operador de SMA y de la marca de los equipos en la red LTE-A.

Para cumplir con el objetivo de las mediciones se establecieron los siguientes parámetros:

- Para evitar la influencia de la marca de los equipos pertenecientes a las redes LTE-A y el operador de SMA que administra su respectiva red, se realizaron pruebas sobre los tres operadores de SMA en una zona de cobertura en la ciudad de Quito.
- Para obtener la suficiente cantidad de información se realizaron mediciones en puntos con diferentes niveles de cobertura, dentro de la zona de cobertura de los operadores de SMA.
- Para abarcar los servicios a los que los usuarios de la red LTE-A tienen acceso, se implementaron tareas en los equipos de medición, las cuales consisten en pruebas de carga y descarga de archivos de diferentes tamaños mediante el protocolo FTP, se realizó pruebas de peticiones a las páginas web más populares en Ecuador, según la página web Alexa.
- El tamaño de los archivos para las pruebas de carga y descarga, fueron seleccionados para obtener una suficiente cantidad de muestras que posteriormente permitan realizar un análisis adecuado.
- Todas las pruebas de medición fueron realizadas desde puntos fijos a fin de que los resultados no sean influenciados con grandes variaciones de los parámetros de cobertura o procesos de *handover* durante las pruebas.

3.4.2.1.3 Procedimiento efectuado durante las pruebas

Para la realización de las pruebas y recolección de datos, se aplicaron las consideraciones expuestas anteriormente, adicional a esto cabe aclarar que los puntos seleccionados antes de las mediciones, se vieron afectados debido a que los mismos fueron limitados por la disponibilidad de estacionar el vehículo para realizar las pruebas.

A continuación, se detalla el procedimiento realizado:

- Se procedió a configurar en el equipo de medición *Sierra Wireless AirPrime* para realizar las pruebas de carga y descarga de archivos y se instalaron las tarjetas SIM correspondientes a los tres operadores de telefonía móvil, la configuración realizada se detalla a continuación:

- Primero se realizó la configuración del equipo de medición, en el cual se configura la tarea para efectuar las pruebas de carga y descarga de archivos mediante el protocolo FTP, utilizando un servidor FTP, con IP pública propiedad de la ARCOTEL. Adicionalmente se configuro tareas para efectuar pruebas de peticiones de acceso a páginas web.
- Se configuraron pruebas de conectividad hacia páginas web seleccionadas por su baja, media y alta carga de contenido, para de esta forma poder analizar el tiempo de carga de las mismas.
- En la configuración de red del equipo de medición se configuró como red predeterminada la red LTE-A 4G, a fin de evitar que el equipo de medición se enganche a otra tecnología (2G o 3G) durante las pruebas.

- Se procedió a seleccionar al polígono de medición en el cual se efectuarán las pruebas, la selección del polígono se realizó considerando la cantidad de radio bases disponibles y que se trate de una zona comercial, por lo cual se estableció la zona delimitada por la Av. Shyris, Av. Eloy Alfaro, Av. 6 de diciembre y Av. Naciones Unidas.
- Primero se realizó un *drivetest* dentro del polígono de medición previamente establecido, a fin de comprobar los niveles de cobertura disponibles en la zona de medición, y con esta información establecer puntos de medición fijos con diferentes valores de cobertura.
- Se procedió con las mediciones en los puntos fijos establecidos, sin embargo, los puntos sobre los cuales finalmente se realizaron las pruebas fueron influenciados por el tráfico vehicular y la disponibilidad para detener el vehículo, por lo que los puntos en los que se realizaron las mediciones variaron de los establecidos previamente.
- En cada punto se realizó una prueba de carga y descarga de archivos, una prueba de conectividad (latencia) y una prueba de acceso a páginas web, esto por cada una de las operadoras de SMA.
- Finalizadas las pruebas se procesó la información obtenida en el Software Tems Discovery, obteniéndose una base de datos de todas las

mediciones realizadas, en las que se procedió a relacionar los parámetros técnicos, realizar gráficas y analizar los resultados.

3.4.2.1.4 Presentación y análisis de resultados

Se procedió a filtrar y analizar los resultados obtenidos tal y como se muestra a continuación:

- Velocidades de carga y descarga de datos relacionadas con los niveles de cobertura (RSRP y RSRQ) obtenidos y presentados de manera conjunta de todos los puntos de medición realizados, tal como se muestra en la Figura 3.28, Figura 3.29, Figura 3.30 y Figura 3.31, las gráficas presentan varios valores de velocidad esto debido a que, para este tipo de tráfico, no GBR, no se garantiza velocidad de datos constante.
- En la Figura 3.28, Figura 3.29, Figura 3.30 y Figura 3.31, el análisis se lo realizó a partir de valores de velocidad de datos máximas logradas sufren un decremento importante, tal y como se muestra en las zonas marcadas en la Figura 3.28, Figura 3.29, Figura 3.30 y Figura 3.31.

De las gráficas presentadas en la Figura 3.28, Figura 3.29, Figura 3.30 y Figura 3.31. Se analizaron los valores en los cuales la velocidad de datos sufre una disminución importante en las velocidades máximas alcanzadas, de este análisis se obtuvo que los valores mínimos de cobertura aceptables son lo que se presentan en la Tabla 3.3.

Parámetro	Prueba realizada	valor recomendado
RSRP	Descarga de archivos	-103 dbm
RSRQ		-11,5 dbm
RSRP	Carga de archivos	-96 dbm
RSRQ		-11,5 dbm

Tabla 3.3 Valores de cobertura mínimos recomendados

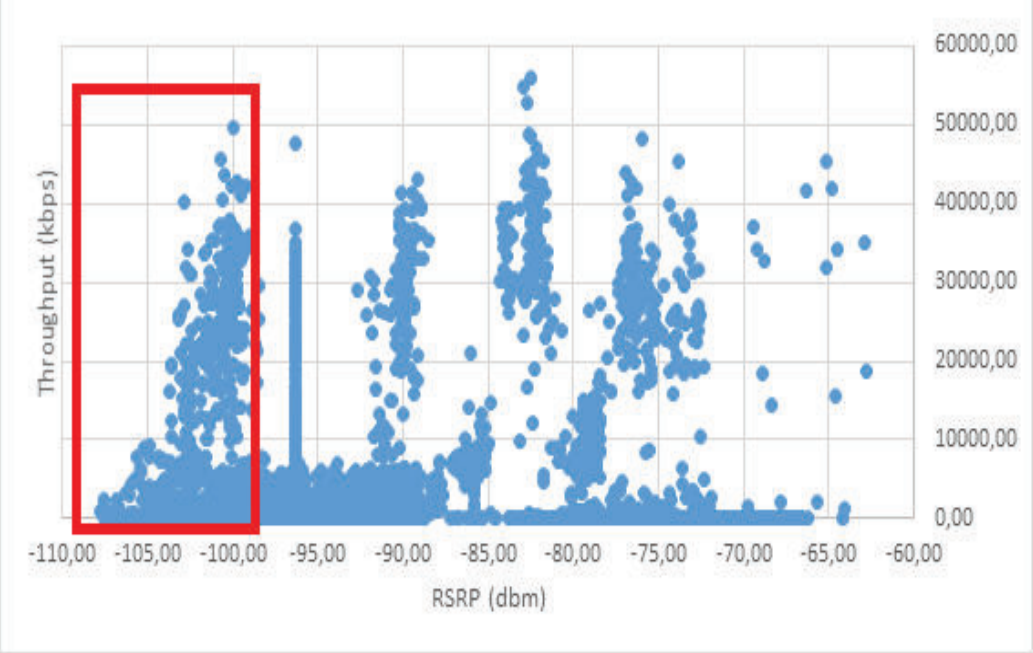

Figura 3.28 RSRP vs THROUGHPUT DL

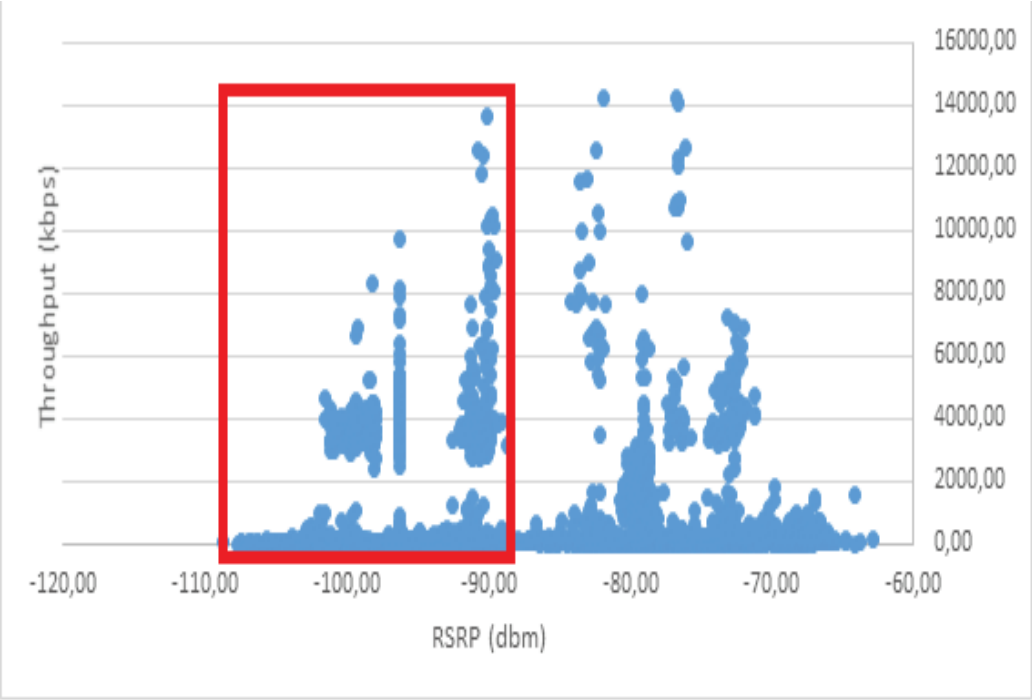

Figura 3.29 RSRP vs THROUGHPUT UL

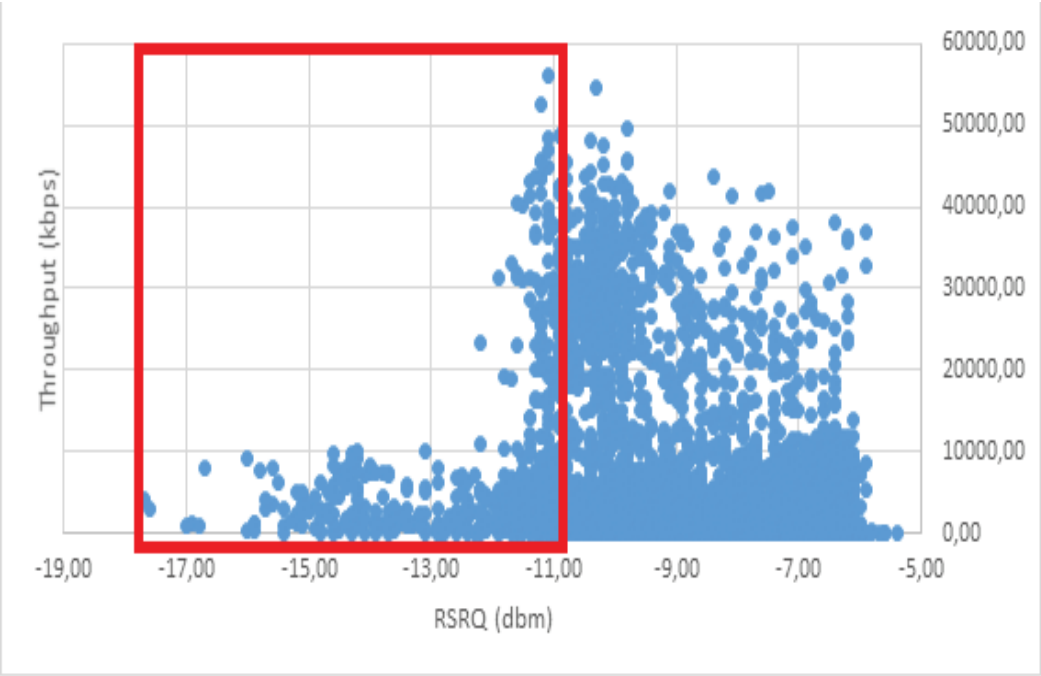

Figura 3.30 RSRQ vs THROUGHPUT DL

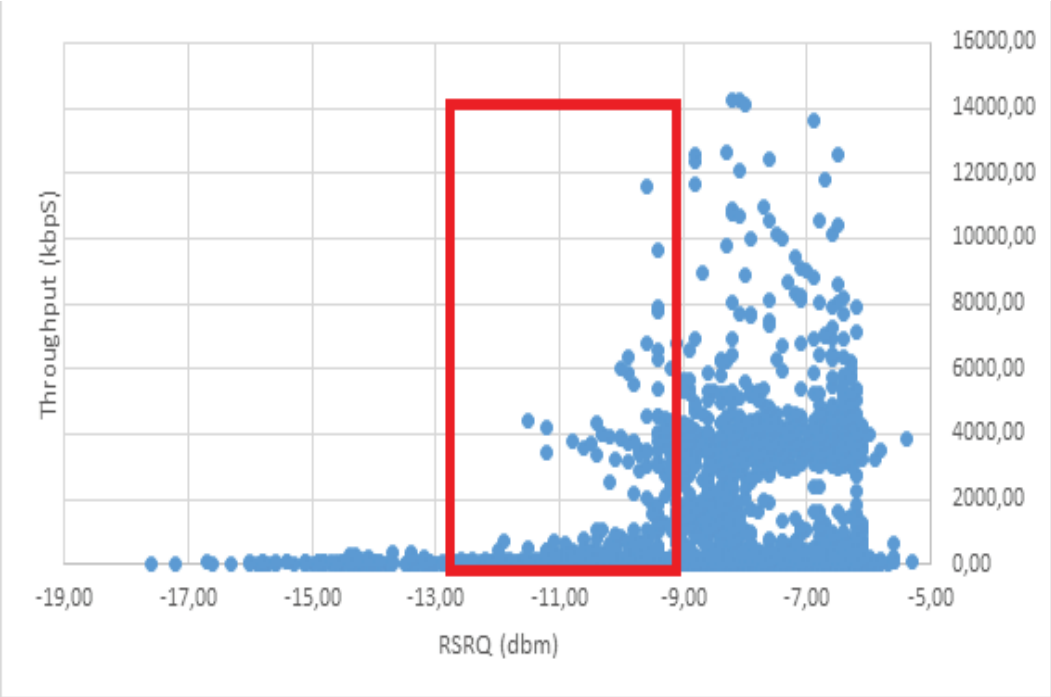

Figura 3.31 RSRQ vs THROUGHPUT UL

- Tiempo de carga de páginas web relacionado a niveles de cobertura (RSRP y RSRQ), información presentada de manera conjunta tal y como se muestra en la Figura 3.33 y Figura 3.33, en las cuales se presentan los

resultados de las pruebas de peticiones realizadas a páginas web, también se observa que los tiempos de carga dependen también del tamaño de las páginas y la influencia de la cobertura sobre el tiempo de carga de las páginas es más notorio en páginas con tamaño mayor.

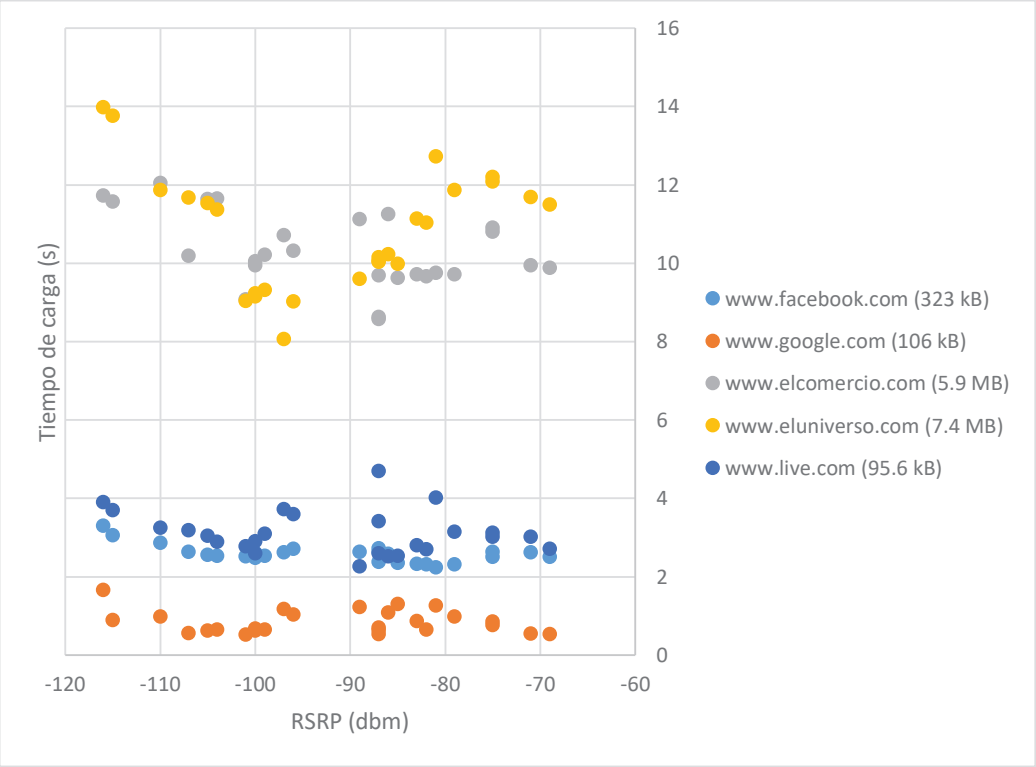

Figura 3.32 Tiempo de carga vs parametro de cobertura RSRP

De las gráficas en la Figura 3.32 y Figura 3.33 se observa que mientras mayor sea el tamaño de la página web a la que se pretende acceder, mayor es la variación del tiempo de acceso respecto de los parámetros de cobertura, por lo que el análisis se realizó en los resultados obtenidos de páginas de mayor tamaño, los resultados del análisis realizado se presentan en la Tabla 3.4.

Parámetro	Prueba realizada	Rango de cobertura recomendado
RSRP	Peticiones a páginas web	-69 a -100 dbm
RSRQ		-7 a -10 dbm

Tabla 3.4 Valores de cobertura mínimos recomendados

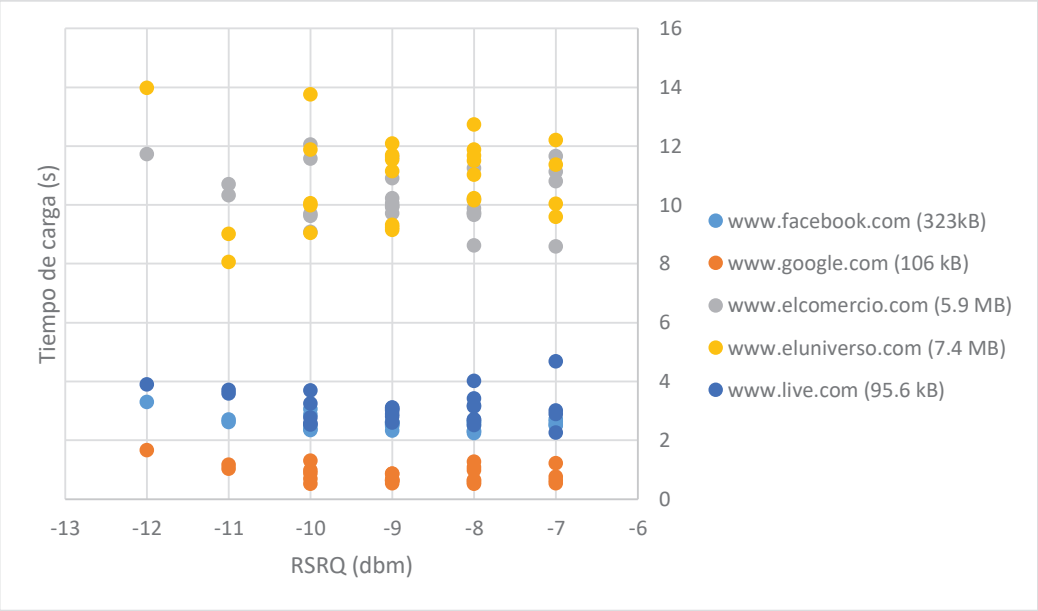

Figura 3.33 Tiempo de carga vs parámetro de cobertura RSRQ

En la Tabla 3.3 se presentan rangos de cobertura los cuales permiten tiempos de carga bajos, para valores inferiores del rango de cobertura recomendado los tiempos de carga de páginas web obtenidos se incrementan considerablemente.

- Las pruebas de latencia se realizaron a la página de mayor acceso y de menor tamaño, es decir a la página de google. A fin de garantizar que los tiempos de retardo en la red sean en su mayoría bajos y por consiguiente garantizar un servicio rápido y de calidad desde el punto de vista del usuario, los tiempos de latencia deben ser los menores posibles, en la Figura 3.34 se puede observar que los valores de latencia son de hasta 200 ms, pero en su mayoría son menores, lo que implica un servicio sin mucho tiempo de espera.
- En la Figura 3.34 también se puede observar que existen tiempos superiores a los 200ms sin embargo son muy pocos, estos tiempos altos pueden ser atribuidos a congestión de la red o a un alto número de peticiones realizadas por otros usuarios al servidor web, sin embargo, para mantener una adecuada QoS es necesario que estos tiempos altos de latencia sean en cantidad lo menos posibles.
- Los valores de BLER obtenidos durante las pruebas de carga y descarga de datos se muestra en la Figura 3.35, en la que se observa que se tiene una mayor densidad de muestras con BLER menor al 20% y una menor

densidad de muestras con valores altos de BLER incluso llegando al 100 %; lo que implica que todos los bloques de datos llegaron con errores, esto puede ser debido a bajos niveles de cobertura o interferencias en el radio enlace, con lo que la eficiencia en la transmision de datos se ve afectada.

- Para obtener un porcentaje de BLER bajo se debe incrementar la potencia en la red, sin embargo, esto implica una disminución de la capacidad de la red, debido a que la potencia es un recurso limitado. Por otra parte, si el BLER es muy alto, implica que son necesarias muchas retransmisiones, lo que implica una degradación del servicio del usuario, por lo que el porcentaje de BLER debe establecerse considerando un equilibrio entre la QoS y capacidad de la red.

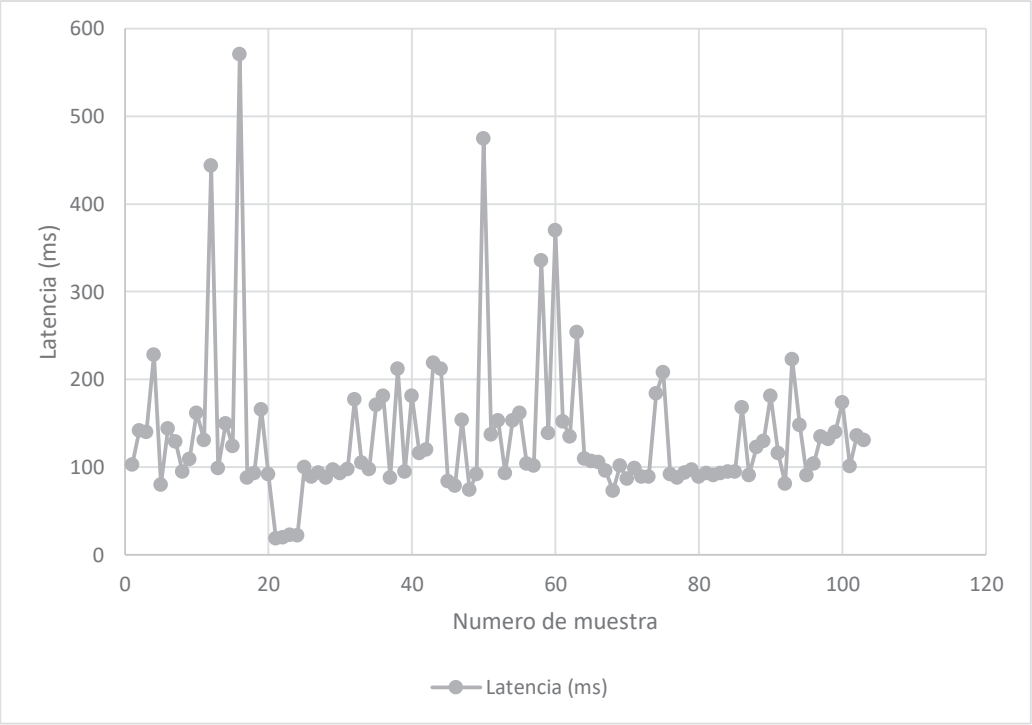

Figura 3.34 Latencia hacia el servidor web de Google

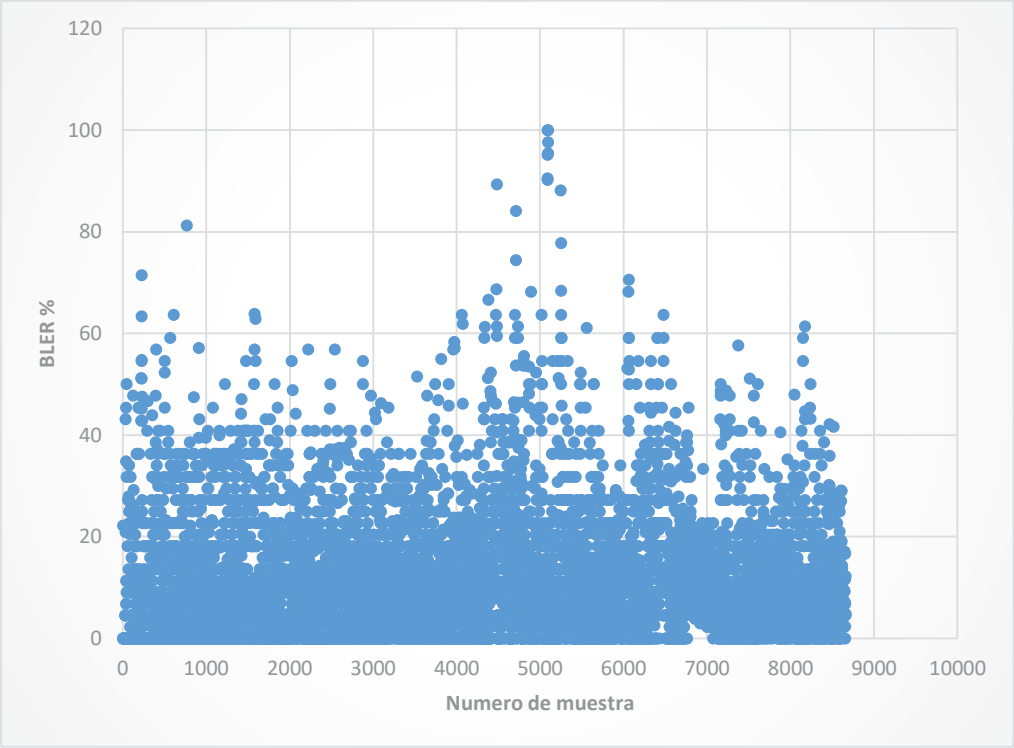

Figura 3.35 BLER obtenido en las pruebas de datos.

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones en base a la información recopilada y los resultados obtenidos.

4.1 CONCLUSIONES

- Debido a la evolución constante de los sistemas de comunicación móvil y de los servicios presentes a través de aplicaciones en los terminales móviles, los usuarios también incrementan las expectativas del servicio que reciben, por lo que es necesario que el organismo de control, en este caso la ARCOTEL, efectúe controles de forma periódica y especializada con cada tecnología que los operadores de SMA proporcionan, a fin de que los usuarios reciban un servicio conforme a lo contratado.
- La calidad de servicio tiene varios puntos de vista como son el de la tecnología o punto de vista técnico, el punto de vista por parte de los usuarios y el punto de vista por parte de los operadores de la red. Se debe encontrar un punto de equilibrio, considerando brindar las mejores prestaciones de los servicios a los posibles a los usuarios.
- Actualmente, los controles hacia los operadores de SMA se encuentran orientados principalmente al servicio de telefonía celular (voz), es decir al tráfico de llamadas, por lo que dicho control no es adecuado para la red de datos LTE-A 4G. Por ello, se deben analizar los datos provenientes parte de la red, efectuar periódicamente mediciones y establecer parámetros técnicos que permitan brindar servicios con diferente QoS de acuerdo a la necesidad de las aplicaciones y de los usuarios.
- Las velocidades alcanzadas durante las pruebas efectuadas indican que los operadores de SMA brindan un servicio comparado e incluso mejor a los proporcionados por proveedores de acceso a Internet con tecnologías como ADSL, enlace inalámbrico punto a punto y fibra hasta la casa, en estas tecnologías los usuarios pueden lograr velocidades de hasta 10 Mbps. Sin embargo, el servicio de datos móviles aún se considera un servicio costoso en nuestro país, debido a que los usuarios pagan por la cantidad de datos utilizados, lo que limita el uso de la red LTE-A en

comparación a servicios de acceso a Internet proporcionados por proveedores ISP (*Internet Service Provider*).

- En el presente trabajo se pudo evidenciar que la QoS con la cual son tratados los datos en la red es proporcionada por las diferentes entidades de red, como son eNB, P-GW y S-GW, dependiendo de los requerimientos del tipo de tráfico que el terminal móvil envía a la red LTE-A. Por consiguiente, para realizar un control externo, el cual es requerido por la ARCOTEL, fue necesario verificar la influencia de los parámetros de cobertura en servicios de carga y descarga de archivos o navegación web, servicios a los que acceden los usuarios mediante aplicativos instalados en sus dispositivos móviles, encontrándose que los parámetros adecuados para el control de calidad son los parámetros de cobertura RSRP y RSRQ.
- Se encuentra que los parámetros de cobertura deben cumplir con valores mínimos. Para la tecnología LTE-A se consideran los parámetros de cobertura RSRP y RSRQ, encontrándose que el nivel mínimo recomendado para RSRP y RSRQ es de -96 dBm y de -11.5 dBm respectivamente para el enlace de subida y de -103 dBm y -11.5 dBm para el enlace de bajada, estos datos se obtuvieron producto del análisis de los datos obtenidos en pruebas de carga y descarga de archivos desde y hacia un servidor FTP.
- Con valores de cobertura mínimos, la ARCOTEL puede realizar mediciones mediante la ejecución de un *drivetest*, lo que implica mayor facilidad en el momento de realizar los controles, ya que de realizarse controles en puntos fijos tomaría mucho más tiempo y no se abarcaría toda la zona que se evalúa.
- Con los niveles de cobertura iguales o mayores a los valores mínimos, que se recomendaron como resultado del análisis de las pruebas realizadas, las velocidades alcanzadas en un terminal son de hasta 45Mbps en el enlace de *dowlink* y 14 Mbps en el enlace de *uplink.*
- Otro factor importante que influye sobre la QoS por el usuario, es el retardo presente en la red, ya que se pueden tener velocidades adecuadas, pero si se tienen altas latencias en los datos la información

tardará en llegar al terminal del usuario, lo que se traduce como un servicio con mala calidad.

- Los retardos en la red LTE-A se producen por la contribución de diferentes tiempos, algunos de los tiempos que introducen retardo en la red son tiempo de procesamiento de los equipos, tiempos de retardo en la transmisión y tiempos introducidos por encolamiento de paquetes. Además, en un servicio extremo a extremo se introducen latencias producidas en redes externas.

4.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda la implementación por parte de las operadoras de SMA de un servidor web que se encuentre dentro de la red LTE-A a fin de evaluar netamente latencias propias de la red LTE-A sin involucrar tiempos introducidos por equipos pertenecientes a una red externa, con lo que la evaluación de latencias en la red LTE-A se realizaría de forma más objetiva.
- Evaluar al azar puntos estáticos dentro de la zona de cobertura de los operadores de SMA periódicamente a fin de verificar el comportamiento de la red, de forma adicional a los controles programados y realizados periódicamente por la ARCOTEL, resultaría ser una buena práctica para mantener un servicio con QoS para los usuarios.
- Se recomienda como trabajo futuro la evaluación de los parámetros de calidad necesarios para el control de la posible implementación de telefonía móvil (voz) celular sobre la red LTE-A 4G, conocida como VoLTE, la cual permitiría a los usuarios el servicio de llamadas a través de la red LTE-A. En la actualidad dicho servicio no es promocionado por las operadoras de SMA en el país.
- Se recomienda la actualización del aplicativo “Señal Movil Ecuador” disponible en Play Store para teléfonos Android que permite la evaluación de parámetros técnicos de las redes 2G y 3G, proporcionado por la ARCOTEL. Para evaluar parámetros de calidad de servicio en redes 4G, además de incluir pruebas que evalúen los diferentes servicios a los

cuales los usuarios tienen acceso, a fin de controlar el servicio proporcionado por los operadores de SMA a través de la red LTE-A.

- Se recomienda realizar como trabajo futuro un análisis de la calidad de servicio de manera conjunta con los operadores de SMA, es decir que los operadores brinden la apertura necesaria a información de estadísticas de calidad de servicio obtenida de sus equipos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Libros, manuales, estándares y documentos científicos:

[1] Gonzalo López Pradas, Dr. D. Luis Javier Reina Tosina, “Predistorsión digital de un sistema de comunicaciones OFDM: Estudio mediante simulación”, Proyecto de fin de carrera, Universidad de Sevilla, Departamento de Teoria de la Señal y Comunicaciones, Sevilla, Julio de 2011

[3] Juan Pablo Calvo Pérez, IT Service Delivery Manager “EL NUEVO PARADIGMA DE LA MOVILIDAD: LTE. DESDE EL 0G HASTA EL 5G”. Madrid, abril, 2015.

[6] *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN),* 3GPP, TR 25.913 - v7.3.0, 2013

[7] Iquall S.A., “LTE Whitepaper”, Mayo 2014

[10] Ramón Agusti, Francisco Bernardo, Fernando Casadevall, RamonFerrús, Jordi Pérez-Romero, Oriol Sallent, "LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Moviles"Fundación Vodafone España,

[13] Fundamentos de diseño y gestión de sistemas de comunicaciones móviles celulares, Escrito por Sallent Roig, Oriol,Pérez Romero, Jordi, Publicado por Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital, 2014

[15] Monitorización del interfaz aire de las operadoras móviles en la E.S.P.E para determinar la QoS. Autores: Minango J. y Duque D. Departamento de Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Ecuador.

[16] Calidad de servicio (QoS) de la red UMTS en la ciudad de Durán, Autores: Guachilema Valencia, Isaac Josue, León Drouet, Iván Andrés. 7-jul-2010

[17] Electronic Communications Committee (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT), “UMTS COVERAGE MEASUREMENTS”, (9, Mayo 2007).

[18] Juan Carlos Martinez, “CALIDAD DE SERVICIO (QoS)”, Universidad Javeriana de Cali, Colombia.

[19] Dra. María del Carmen Romero Ternero, “Calidad de Servicio (QoS) en redes”, Programa de doctorado Informática Industrial 2009-2010, Departamento de Tecnología Electrónica – Universidad de Sevilla Programa de doctorado Informática Industrial 2009-2010

[21] RESOLUCION, TEL-042-01-CONATEL-2014, PARÁMETROS DE CALIDAD PARA EL SERVICIO MÓVIL. AVANZADO, 2014, Quito, Ecuador.

[22] Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Characteristics of the Universal Subscriber Identity Module (USIM) application, ETSI TS 131 102 V12.5.0 (2014-10)

[24] (Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Characteristics of the Universal Subscriber Identity Module (USIM) application (3GPP TS 31.102 version 12.5.0 Release 12), ETSI TS 131 102 V12.5.0 (2014-10).

[24] *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Quality of Service (QoS) concept and architecture,* 3GPP, TS 23.107 version 5.10.0, Release 5, 2003.

[25] LTE The UMTS Long Term Evolution, From theory to Practice, Editado por: Stefania Sesia, Issam Toufk, Matthew Baker; Segunda edición.

[26] *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Quality of Service (QoS) concept and architecture,* LTE; 3GPP, TS 23.107 version 10.1.0, Release 10, 2011.

[30] *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation,* 3GPP, TS 36.211 version 10.0.0, Release 10, 2011.

[31] *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE coverage enhancements*, 3GPP, TR 36.824, Release 11, 2012.

[32] Top Optimized Technologies, “Estudio sobre los requisitos técnicos que permitan caracterizar la cobertura con tecnología LTE necesaria para proporcionar determinados servicios de datos”, Dirección General de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información.

[33] *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio access capabilities*, ETSI, TS 136 306 V12.3.0, 2015.

[40] ETSI Estándares, [En línea]. Disponible en: http://www.etsi.org/ Ultimo acceso: 04/01/2017.

[41] Maribel Geovanna Fuentes (2010), “Estudio técnico para la recomendación de los parámetros de calidad de servicio SMA sobre redes móviles UMTS en el Ecuador, Sangolqui – Ecuador.

[42] Indhira Cynthia del Pilar (Diciembre del 2012), “Estudio de la calidad de servicio de las redes móviles en el Perú”, Lima – Perú.

[43] Sandvine Incorporated, “Voice over LTE: Challenges and Opportunities”, Basingstoke, UK, ULC 2003-2017, documento técnico para la industria.

[44] Dr. Parag Pruthi, Dr. Ashutosh Dutta, “QoS Requirements for VoLTE”, GISFI, Junio 18-20, 2012

Información en línea:

[2] Dolores Jiménez y Muro 10, P. (11 de 04 de 2016). 43 Aniversario de la Primera Llamada Celular, [En línea]. Disponible en: http://t3mexico.mx/43-aniversario-la-primera-llamada-celular/, Ultimo acceso: 05/10/2016

[4] Alastair Brydon, (5, October 2012). Summary of 3GPP Standards Releases for LTE. [En línea]. Disponible en: http://www.unwiredinsight.com/2012/3gpp-lte-releases. Ultimo acceso: 05/10/2016

[5] Dino Flore, (18, Febrero 2015). Evolution of LTE in Release 13. [En línea]. Disponible en: http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1628-rel13 Ultimo acceso: 05/10/2016

[8] Tutorialspoint S.A, LTE Tutorial, [En línea]. Disponible en: https: //www.tutorialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm, Ultimo acceso: 05/10/2016.

[9] Jeanette Wannstrom (junio 2013). LTE Advanced, [En línea]. Disponible en: http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced, Ultimo acceso: 12/10/2016.

[11] Bart Barton, (8, Enero 2012), LTE AND BEYOND, [En línea]. Disponible en: http://www.lteandbeyond.com/2012/01/interfaces-and-their-protocol-stacks.html, Ultimo acceso: 12/10/2016.

[12] Revolutionwifi, (1, Enero 2015), PHY Basics: How OFDM Subcarriers Work, [En línea]. Disponible en: http://www.revolutionwifi.net/revolutionwifi/2015/3/how-ofdm-subcarriers-work, Ultimo acceso: 12/10/2016.

[14] JAN WHITACRE Agilent Technologies Santa Clara, CA, (2 Enero 2010), [En línea]. Disponible en: http://www2.electronicproducts.com/A_primer_on_MIMO_in_LTE-article-farc_agilent_feb2010-html.aspx, Ultimo acceso: 12/10/2016.

[20] 4G Americas, BELLEVUE, Washington (21, Octubre de 2014), Agregación de portadoras: una tecnología a prueba de futuro, [En línea]. Disponible en: http://www.4gamericas.org/es/newsroom/press-releases/agregacion-de-portadoras-una-tecnologia-prueba-de-futuro/, Ultimo acceso: 15/10/2016.

[23] Evelio Martínez, (Mayo del 2001), La evolución de la telefonía móvil, En línea]. Disponible en: http://www.eveliux.com/mx/La-evolucion-de-la-telefonia-movil.html, Ultimo acceso: 02/04/2016.

[27] SPLOTY Sp. (2014-2016). Sploty E-UTRAN Training (fragment), En línea]. Disponible en: http://www.sploty.com/pl/apn-ambr-and-ue-ambr.html, Ultimo acceso: 15/10/2016.

[28] Rachel Johnson, (13, Octubre 2013), Quality of Service (QoS) in LTE, [En línea]. Disponible en: http://www.simpletechpost.com/2013/01/quality-of-service-qos-in-lte.html, Ultimo acceso: 15/10/2016.

[29] Netmanias, (11, Septiembre 2013), LTE QoS: SDF and EPS Bearer QoS, [En línea]. Disponible en: http://www.netmanias.com/en/?m=view&id=techdocs&no=5908, Ultimo acceso: 15/10/2016.

[34] Labels Tems Investigation, (1, Junio 2011), Tems Investigation 12 (User Interface), [En línea]. Disponible en: http://pathloss40.blogspot.com/2011/06/tems-investigation-12-user-interface.html, Ultimo acceso: 13/12/2016.

[35] Cobertura promocionada por proveedor de SMA CNT E.P. [En línea]. Disponible en: http://gis.cnt.com.ec/apppublico/, Ultimo acceso: 13/12/2016.

[36] Cobertura promocionada por proveedor de SMA Movistar, [En línea]. Disponible en: http://www.movistar.com.ec/productos-y-servicios/cobertura, Ultimo acceso: 13/12/2016.

[37] Analyze, optimize and visualize your RAN data, [En línea]. Disponible en: http://www.tems.com/products-for-radio-and-core-networks/radio-network-engineering/ran-data-analysis-optimization, Ultimo acceso: 13/12/2016.

[38] TEMS™ Discovery Network 10.0, Technical Product Description, [En línea]. Disponible en: https://www.2test.ru/upload/iblock/325/tems-discovery-network-11.0-_-technical-product-description_2test.pdf, Ultimo acceso: 17/12/2016.

[39] Top de las páginas web más populares en Ecuador, [En línea]. Disponible en: http://www.alexa.com/topsites/countries/EC, Ultimo acceso: 04/01/2017

ANEXOS

Anexo A: Especificaciones técnicas equipos de medición Sierra Wireless AirPrime MC7700

Sierra Wireless AirPrime® Embedded Wireless Modules MC Series

High-Speed Connectivity for Industrial Applications and Mobile Computing

Sierra Wireless AirPrime® MC Series embedded modules deliver high speed connectivity with a variety of advanced air interfaces, including LTE frequencies, designed for industrial M2M and mobile computing solutions.

These modules support LTE, HSPA+, HSPA+ and EV-DO to address networks worldwide and are delivered with a comprehensive set of SDKs and enabling software.

AirPrime MC Series are standard PCI Express Mini Cards with a USB2.0 interface and industrial specifications* to simplify integration and provide an easy upgrade path to new network technologies.

MC73xx

LTE/HSPA+/GSM/GPRS/EDGE/EV-DO Rev A/1xRTT modules, with data speeds up to 100Mbps downlink and 50 Mbps uplink and based on the latest chipset. MC7354/50/50-L/04 feature LTE Quality of Service, VoLTE**/CSFB voice on 3G/2G/CDMA 1xRTT network and an extended set of LTE bands covering worldwide operators.

MC9090

HSPA+/EVDO module with multimode functionality to switch from one operator to another in North America with one single product reference. It features industrial temperature rating, voice and support quad-band GSM/GPRS/EDGE.

MC8805

HSPA+, GSM/GPRS/EDGE modules and support 42 Mbps downlink and 5.76 Mbps uplink speeds for worldwide market.

MC77xx

LTE/HSPA+ or LTE/EV-DO modules, with data speeds up to 100Mbps downlink and 50Mbps uplink.

MC809x

HSPA+ tri-band or dual-band modules for global deployments, as well as quad-band GSM/GPRS/EDGE and voice support.

MC870x

HSPA+ quad-band modules, offering up to 21 Mbps download speed. MC8704 supports voice.

MC5728V

EV-DO Rev A module providing compatibility with widely available CDMA EV-DO Rel 0 and 1x networks and voice support.

*Industrial specifications apply to MC73xx, MC9090, MC8805, MC809x
**VoLTE feature is coming soon

KEY BENEFITS:

- Easy to integrate: Standard PCI Express Mini Card form factor with industrial specifications*
- High-speed cellular connectivity with the latest technologies and multi-operator support
- Easy upgrade path to new network technologies

Essential

SIERRA WIRELESS | AirPrime

Sierra Wireless AirPrime®
Embedded Wireless Modules
MC Series

Specifications

	MC7710	MC8700	MC8800	MC8705	MC7700
RF INTERFACE					
	EV-DO Rev A, 1xRTT	HSPA+, GSM/GPRS/EDGE	HSPA+, GSM/GPRS/EDGE, EV-DO Rev A, 1xRTT	HSPA+, GSM/GPRS/EDGE	LTE, HSPA+, GSM/GPRS/EDGE, EV-DO Rev A (MC7750), 1xRTT (MC7750)
DATA SPEED					
Peak Download Rate	3.1 Mbps	14.4 Mbps	HSPA+ 14.4 Mbps; EVDO 3.1 Mbps	21.1 Mbps	100 Mbps
Peak Upload Rate	1.8 Mbps	5.76 Mbps	HSPA+ 5.76 Mbps; EVDO 1.8 Mbps	5.76 Mbps	50 Mbps
FREQUENCY BANDS					
LTE					MC7700: 2100 (B1), AWS (B4), 700 (B17); MC7710: 2100 (B1), 1900 (B2), 2600 (B7), 800 (B8), 800 (B20); MC7750: 700 (B13)
WCDMA		MC8700: 850/1900/2100 MHz; MC8705: 850/2100 MHz	850/900/1900/2100 MHz	850/900/1900/2100 MHz	MC7700: 2100 (B1), 1900 (B2), 850 (B5); MC7710: 2100 (B1), 850 (B5)
GSM/GPRS/EDGE	850/1900 MHz		850/1900 MHz		MC7750: 850 (B5), 1900 (B2)
	850/900/1800/1900 MHz		850/900/1800/1900 MHz	Quad-band	Quad-band
APPROVALS					
Regulatory	FCC, IC	MC8700: FCC, IC, PTCRB; MC8705: CE, GCF-CC	FCC, IC, PTCRB, NCC	CE, FCC, IC, NCC, PTCRB, GCF-CC	MC7700: FCC, IC, NCC, PTCRB, JATE/TELEC; MC7710: CE, GCF-CC, NCC; MC7750: FCC, IC, NCC
Carrier	Verizon, Sprint, AMX	AT&T, NTT DOCOMO	AT&T, Sprint, Verizon	TMO, TMUS, TMUS (MC8705), SoftBank (MC8705), AT&T (MC8705)	MC7700: AT&T, NTT DOCOMO, SKT, TMUS, Rogers; MC7710: T-Mobile; MC7750: Verizon
CPU PERFORMANCE					
IO voltage	1.8 V	1.8 V	1.8 V	1.8V (MC8705)	1.8V
AUDIO					
Analog Audio	1 (12dBm/0.0dB -13.5 dBm/0.0)				
Digital Audio	PCM	PCM	PCM	MC8705: I2S	
Codec	HR, FR, EFR, AMR			(MC8705): AMR-NB, GSM-HR, GSM-FR, GSM-EFR, GSM-CTM	
Echo Cancellation & Noise reduction	✓	✓	✓	MC8705: ✓	
DTMF	✓	✓	✓	MC8705: ✓	
INTERFACES					
UART	13.0 Mbps	13.4 Mbps	13.0 Mbps		
USB	USB 2.0 High speed	USB 2.0 High speed	USB 2.0 High speed	USB 2.0 High speed	USB 2.0 High speed
Main Radio Disable	✓	✓	✓	✓	✓
Wake	2.5V	1.8V	1.8V		
ADC	1				
GPIO	8	8	8	8	8
Flash LED output	1	1	1	1	1
SIM Interface		1.8 or 3V	1.8 or 3V	1.8 or 3V	1.8 or 3V
ANTENNA					
U.FL Antenna Connectors	2	3	3	2	3
Diversity	✓	✓	✓	✓	✓
MIMO					✓
GPS Rx					✓
LOCATION SOLUTIONS					
	Standalone, gpsONE®	Standalone, A-GPS, gpsONE	Standalone, A-GPS, gpsONE	Standalone, A-GPS, gpsONE	Standalone, A-GPS, gpsONE, Galileo
CONTROL SOFTWARE					
	AT Commands, CDMA	AT Commands, CDMA	AT Commands, GSM API	AT Commands, CDMA	AT Commands, GSM API
TCP IP					
	TCP/UDP	TCP/UDP	TCP/UDP		
DRIVERS					
Windows® Mobile 6.5	✓	✓	✓	✓	
Windows® CE 6.0	✓	✓	✓	✓	
Android		✓	✓	✓	✓
Linux	✓	✓	✓	✓	✓
DEVICE DIMENSIONS					
	51 X 30 X 4.6(MM)	51 X 30 X 4.6(MM)	51 X 30 X 4.6(MM)	51 X 30 X 4.6(MM)	51 X 30 X 4.7(MM)
OPERATIONAL TEMPERATURE					
	-30°C to +70°C	-40°C to +85°C	-40°C to +85°C	-30°C to +70°C	-30°C to +70°C

SIERRA WIRELESS | AirPrime

Anexo B: Resultados obtenidos de las mediciones realizadas presentados de forma digital.

El presente anexo consta de forma digital en los siguientes archivos: