



Universidad Católica Andrés Bello
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones



“Estudio y caracterización de la integración e implementación del estándar LTE (*Long Term Evolution*) a las redes existentes de la Corporación DIGITEL C.A.”

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO
Presentado ante la
UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
Como parte de los requisitos para optar al título de
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

EFFECTUADO POR

Patricia Florido

Gianfranco Navea

TUTOR

Miguel De Oliveira

Caracas, Septiembre de 2012

**ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LA INTEGRACIÓN E
IMPLEMENTACIÓN DEL ESTÁNDAR LTE (*LONG TERM EVOLUTION*) A
LAS REDES EXISTENTES DE LA CORPORACIÓN DIGITEL C.A.**

Florido, Patricia

patriciaeflorido@gmail.com

Navea, Gianfranco

gianfranco12@gmail.com

RESUMEN

La telefonía móvil ha crecido considerablemente en los últimos años, culminando en el estándar LTE (*Long Term Evolution*) y LTE-Advanced. En Venezuela las empresas de telecomunicaciones buscan mejorar la calidad de sus servicios, expandir su cobertura y estar a la vanguardia de nuevas tecnologías. Este Trabajo Especial de Grado se planteó con la finalidad de contribuir con estudios sobre la implementación e integración del estándar LTE en las redes existentes de la Corporación DIGITEL. Inicialmente se realizó un informe documental para proveer las bases de estudio necesarias y efectuar la caracterización de la arquitectura y descripción de la red. De esta forma, llevar a cabo la realización de protocolos de prueba en una red LTE piloto. Entre los resultados más relevantes de este estudio se destacan los pasos a seguir para lograr la integración del estándar LTE, se corrobora la viabilidad de la implementación de LTE en la banda de 1800 MHz, así como las opciones de servicios de voz y datos disponibles. LTE se muestra como una verdadera tecnología móvil de banda ancha que permitirá ofrecer a los usuarios servicios de mayor calidad y rapidez.

Palabras Claves: LTE, evolución, caracterización, frecuencia.

DEDICATORIA

Este proyecto representa una gran meta en mi vida, es por ello que quiero dedicárselo:

A mis padres a quienes respeto y quiero por encima de todas las cosas, por brindarme su amor incondicional, apoyo ante cualquier situación, paciencia y estímulo, por ser mi admiración y ejemplo a seguir. A mi primo Gustavo quien me dio los indicios y por motivarme a estudiar esta carrera e inspirar el deseo de superación en mí. A mis tíos Tico y Tiby por haberme dado ese primer apoyo en los primeros años de mi carrera. A mis hermanas, mis abuelas, mis tías Pelu y Rebe, mi tío Alejandro, a toda mi familia y a mis amigos por apoyarme en diferentes momentos de mi vida y estar siempre a mi lado.

Patricia Florido

A mi padre y madre quienes me dieron la vida, me forjaron con el temple de la superación y con la premisa de siempre apuntar más lejos de mis horizontes. A mi abuela que representa la dedicación familiar con base en el amor a sus hijas y nietos, siempre presente en mis días. A mis tías, quienes fueron mi sustento en muchas situaciones y la voz que invita al raciocinio. A mi prima, que aún pequeña, espero el día que comparta el mismo orgullo que siento. A mis amigos con los que compartí la universidad y la hicieron amena, los que están presentes en estos momentos de mi vida y especialmente a aquellos que lo único que nos separa es la distancia, siempre apoyándome; gracias a todos.

Gianfranco Navea

AGRADECIMIENTOS

Ante que todo a Dios por darnos cada oportunidad y guía en el camino de nuestros logros.

Expresamos nuestros agradecimientos a la Universidad Católica Andrés Bello por brindarnos las herramientas que nos permiten forjar nuestro futuro, por contribuir en nuestra formación integral y contribuir con el cumplimiento de las metas.

A nuestros padres, de quienes somos el reflejo de su esfuerzo y dedicación. Nuestras familias y amigos que nos brindaron su apoyo a lo largo de la carrera.

A la Corporación DIGITEL por permitirnos llevar a cabo el presente proyecto.

A nuestra revisora María Gabriela Rodríguez y a nuestro tutor Miguel De Oliveira quienes nos apoyaron a lo largo del desarrollo del proyecto, brindándonos sus conocimientos, colaboración y paciencia.

Gracias a todos.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
INTRODUCCIÓN	xv
CAPITULO I.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO	1
I.1 Planteamiento del Problema.....	1
I.2 Objetivos	1
I.2.1 Objetivo general	2
I.2.2 Objetivos específicos.....	2
I.3 Limitaciones y Alcances	2
I.4 Justificación	3
CAPITULO II	4
MARCO REFERENCIAL	4
II.1 Evolución de la telefonía móvil.....	4
II.1.1 1G: la Primera Generación de la Telefonía Móvil.....	5
II.1.2 2G: la Segunda Generación de la Telefonía Móvil.....	5
II.1.3 3G: la Tercera Generación de la Telefonía Móvil	6
II.1.4 4G: la Cuarta Generación de la Telefonía Móvil.....	7
II.2 LTE.....	8
II.2.1 Estandarización	8
II.2.2 Arquitectura del sistema LTE	9
II.2.2.1 EPC.....	11
II.2.2.1.1 Entidades de red que conforman el EPC	12
II.2.2.2 E-UTRAN	14
II.2.2.1.1 Entidades de red que conforman el E-UTRAN	14
II.2.2.1.2 Comparativa entre E-UTRAN y UTRAN	15
II.2.2.3 UE.....	15

II.2.2.4 Interfaces de red	16
II.2.3 Soporte de itinerancia (<i>roaming</i>)	18
II.2.4 Servicios ofrecidos por LTE	19
II.2.4.1 Calidad de Servicio (QoS).....	20
II.2.5 Comparación de las tecnologías 3G con 4G	21
II.3 Sistema de antenas múltiples	22
II.3.1 MIMO	22
II.4 Técnicas de duplexado.....	24
II.5 Esquemas de acceso.....	25
II.5.1 OFDMA	25
II.5.2 SC-FDMA	25
II.6 Protocolos	26
II.6.1 Protocolos del sistema LTE	26
II.6.1.1 Protocolo de la interfaz U_u	26
II.6.1.2 Protocolos en las interfaces S1 y X2	28
II.6.1.3 Plano de usuario entre UE y EPC.....	30
II.6.1.4 Plano de control entre UE y EPC	31
II.6.2 Protocolo IP.....	32
II.6.2.1 Protocolo TCP	32
II.6.2.2 Protocolo FTP.....	33
II.6.2.3 Protocolo UDP	33
II.7 LTE en otros países	33
CAPITULO III.....	34
MARCO METODOLÓGICO.....	34
III.1 Diseño y tipo de investigación	34
III.2 Variables: Definición conceptual y operacional.....	36
III.2.1 Objeto de estudio	36
III.3 Unidad de Análisis	37
III.4 Recolección de información	38
III.5 Pertinente al desarrollo	39
III.5.1 Investigación y consulta documental	39
III.5.2 Pruebas a realizar	40
III.5.2.1 Caracterización de la red y compatibilidad.....	40
III.5.2.2 Planificación de pruebas	43

III.6 Fase final y resultados	45
CAPÍTULO IV	46
DESARROLLO	46
IV.1 Descripción general de la red interna LTE de la Corporación DIGITEL	46
IV.1.1 Interconexión de los eNBs y centros de conmutación.....	50
IV.1.2 Interconexión de nodos.....	51
IV.1.3 Intervinientes en la señalización.....	52
IV.1.4 Interconexión con otras operadoras	52
IV.1.5 Medición del desempeño del sistema	53
IV.1.6 Capacidades del sistema	53
IV.1.6.1 Capacidad a instalar	54
IV.1.6.2 Escalabilidad y modularidad del sistema.....	54
IV.1.6.3 Estimación de la demanda de usuarios	54
IV.1.7 Generalidades de la calidad de servicio.....	54
IV.1.8 Uso del espectro.....	56
IV.1.9 Celdas o radio bases	57
IV.1.10 Características de la red de acceso inalámbrica.....	59
IV.1.10.1 Técnicas de acceso a utilizar.....	59
IV.1.10.2 Protocolos a utilizar	59
IV.1.11 Servicios en LTE ofrecidos por la Corporación DIGITEL	60
IV.1.11.1 Servicios conmutados por paquetes de Persona a Persona	60
IV.1.11.2 Servicios de contenidos	60
IV.1.11.3 Otros Servicios.....	60
IV.2 Caracterización de LTE en las redes de la Corporación DIGITEL.....	61
IV.2.1 Configuración general de las pruebas.....	61
IV.2.1.1 Definición de Potencia sobre Radio Frecuencia	62
IV.2.1.2 Puntos de Prueba.....	62
IV.2.1.3 Herramientas de prueba	63
IV.2.1.4 Consideraciones a tomar	63
IV.2.2 Pruebas generales	64
IV.2.2.1 Pruebas de funcionalidad	64
IV.2.2.1.1 Prueba de funcionalidades básicas	64
IV.2.2.1.1.1 Soporte de celdas a velocidades predeterminadas	64
IV.2.2.1.2 Pruebas de handover	66
IV.2.2.1.2.1 Intra eNB handover	66
IV.2.2.1.3 Pruebas de calidad de servicio	67
IV.2.2.1.3.1 Prueba de complicación de servicio	67

IV.2.2.1.3.2 Prueba de downlink con torrent.....	68
IV.2.2.2 Pruebas de rendimiento.....	69
IV.2.2.2.1 Pruebas de latencia.....	69
IV.2.2.2.1.1 Latencia Plano de Usuario.....	69
IV.2.2.2.1.2 Latencia de modo idle a modo activo.....	70
IV.2.2.2.2 Prueba de medición de DL/UL throughput con un UE.....	71
IV.2.2.2.2.1 Servicio uplink UDP.....	71
IV.2.2.2.2.2 Servicio downlink UDP.....	73
IV.2.2.2.2.3 Servicio de uplink FTP.....	74
IV.2.2.2.2.4 Servicio de downlink FTP.....	75
IV.2.2.2.3 Pruebas de capacidad de la celda.....	76
IV.2.2.2.3.1 Uplink UDP throughput.....	76
IV.2.2.2.3.2 Downlink UDP throughput.....	77
IV.2.2.2.3.3 Uplink FTP throughput.....	78
IV.2.2.2.3.4 Downlink FTP throughput.....	79
IV.2.2.2.4 Pruebas de cobertura.....	80
IV.2.2.2.4.1 Visión general de las pruebas.....	80
IV.2.2.3 Pruebas de experiencia del usuario.....	81
IV.2.2.3.1 Pruebas de servicios básicos.....	81
IV.2.2.3.1.1 Video streaming.....	81
IV.2.2.3.2 Pruebas de servicios de Internet.....	82
IV.2.2.3.2.1 Rendimiento del video streaming.....	82
IV.2.2.3.2.2 Prueba de navegación a través de la web.....	82
IV.3 Espectro de frecuencia a utilizar.....	83
IV.3.1 Ventajas de LTE en la banda de 1800 MHz.....	86
IV.4 Integración al estándar LTE.....	86
IV.4.1 Integración a la arquitectura de la red LTE.....	86
IV.4.2 Soluciones para servicios de voz y datos.....	89
IV.4.2.1 CSFB.....	89
IV.4.2.2 SR-VCC.....	91
IV.4.2.3 One Voice.....	92
IV.4.2.4 VOLGA.....	92
IV.5 Tecnologías competidoras.....	92
IV.5.1 CDMA2000.....	92
IV.5.2 WiMAX.....	93
IV.5.3 LTE-Advanced.....	94
CAPÍTULO V.....	96

RESULTADOS.....	96
V.1 Descripción de la red interna LTE de la Corporación DIGITEL	96
V.2 Pruebas generales	97
V.2.1 Pruebas de funcionalidad	98
V.2.1.1 Pruebas de funcionalidades básicas.....	98
V.2.1.2 Pruebas de handover	98
V.2.1.3 Pruebas de calidad de servicio	98
V.2.2 Pruebas de rendimiento.....	99
V.2.2.1 Pruebas de latencia.....	99
V.2.2.2 Pruebas de medición del DL/UL throughput con un UE	100
V.2.2.3 Pruebas de capacidad de la celda	101
V.2.2.4 Pruebas de cobertura	102
V.2.3 Pruebas de experiencia del usuario	102
V.2.3.1 Pruebas de servicios básicos	102
V.2.3.2 Prueba de servicios de Internet.....	102
V.3 Espectro de frecuencia a utilizar.....	103
V.4 Integración al estándar LTE	103
V.5 Tecnologías competidoras	104
CONCLUSIONES	105
RECOMENDACIONES	106
BIBLIOGRAFÍA	107
APÉNDICE A.....	110
REDES LTE ALREDEDOR DEL MUNDO.....	110
ANEXO A.....	114
LISTA DE ACRÓNIMOS	114
ANEXO B.....	118
TABLA COMPARATIVA DE LTE Y WiMAX	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de GSM..	4
Figura 2. Arquitectura del sistema LTE.	10
Figura 3. Componentes e interfaces de la red LTE	11
Figura 4. Comparativa de la arquitectura de red de E-UTRAN y UTRAN	15
Figura 5. FDD.	24
Figura 6. TDD.	24
Figura 7. Protocolos de la interfaz de radio.	27
Figura 8. Protocolos en las interfaces S1 y X2.	29
Figura 9. Protocolos del plano usuario UE-EPC.	30
Figura 10. Protocolos del plano de control entre UE-EPC.	31
Figura 11. FileZilla Cliente.	41
Figura 12. Interfaz Net Meter.	42
Figura 13. Programa RxTx.	42
Figura 14. Programa Jperf.	43
Figura 15. Esquema general de la red central.	47
Figura 16. Arquitectura básica LTE.	48
Figura 17. Interconexión de eNBs y centros de conmutación	50
Figura 18. Esquema de interconexión para la red de frecuencia 1800.	52
Figura 19. Diagrama de conexión para llamada de datos	56
Figura 20. Enlace ascendente	57
Figura 21. Enlace descendente	57
Figura 22. Equipos e interfaces de la celda LTE.	58
Figura 23. Puntos Fijos de Prueba	62
Figura 24. Puntos móviles de prueba	63
Figura 25. Resultados Soporte Velocidades a 10 Mbps.	65
Figura 26. Resultados Soporte Velocidades a 20 Mbps.	65
Figura 27. Soporte de celdas velocidad 100 Mbps uplink	65
Figura 28. Soporte de celdas velocidad 100 Mbps downlink	65
Figura 29. Diagrama del downlink throughput durante el handover	67
Figura 30. Downlink throughput UDP.	68
Figura 31. Downlink throughput UDP cuando quedaron limitados los recursos.	68
Figura 32. Velocidades downlink para archivo torrent	69
Figura 33. Hilos de ejecución transmitidos en uplink UDP	72
Figura 34. Velocidad de uplink UDP	72
Figura 35. Downlink UDP con la configuración 2x2 Transmit Diversity.	73
Figura 36. Downlink UDP con la configuración 2x2 MIMO adaptativo.	73
Figura 37. Velocidades uplink FTP	74

Figura 38. Velocidades para el downlink FTP 2x2 MIMO adaptativo.....	75
Figura 39. Downlink TCP con la configuración 2x2 Transmit Diversity.....	75
Figura 40. Velocidades uplink UDP del UE1	76
Figura 41. Velocidades uplink UDP del UE2	77
Figura 42. Throughput de la celda, UE1, UE2 y UE3.	77
Figura 43. Velocidades uplink FTP del UE1	78
Figura 44. Velocidades uplink FTP del UE2	78
Figura 45. Velocidades downlink FTP del UE1	79
Figura 46. Velocidades downlink FTP del UE2	79
Figura 47. Valores del throughput en la ruta recorrida	80
Figura 48. Servicio video streaming	81
Figura 49. Rendimiento del video streaming	82
Figura 50. Prueba de rendimiento de Web Browsing	83
Figura 51. Espectro radioeléctrico de las operadoras en Venezuela.	84
Figura 52. Elementos de la eficiencia espectral.	86
Figura 53. Diferencias entre la arquitectura de la red UMTS y la red LTE.....	88
Figura 54. Migración de UMTS a LTE.....	89
Figura 55. Arquitectura CS-Fallback	90
Figura 56. Redes con arquitectura.....	91
Figura 57. Comparación de la eficiencia espectral para uplink	95
Figura 58. Comparación de la eficiencia espectral para voz.....	95
Figura 59. Zona de buffer.....	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de tecnologías 3G y 4G.	22
Tabla 2. Comparación entre planeamientos cuantitativos y cualitativos.	37
Tabla 3. Interfaces del sistema LTE según el Release 8 del 3GPP.	49
Tabla 4. Entidades del sistema LTE según el Release 8 del 3GPP.	49
Tabla 5. Capacidad de tráfico de la red.	54
Tabla 6. Estimación demanda de usuarios.	54
Tabla 7. Llamada de datos LTE.	55
Tabla 8. Requerimientos y capacidades LTE.	57
Tabla 9. Capacidad de transmisión de datos de las estaciones.	58
Tabla 10. Técnicas a utilizar.	59
Tabla 11. Protocolos a utilizar en el sistema UE-EPC.	59
Tabla 12. Configuración General de las pruebas.	61
Tabla 13. Definición Potencia.	62
Tabla 14. Herramientas de prueba.	63
Tabla 15. Resultado latencia plano usuario en milisegundos.	70
Tabla 16. Resultados de las pruebas de latencia de Idle a activo.	71
Tabla 17. Redes LTE alrededor del mundo.	113
Tabla 18. Características de las tecnologías LTE y WiMAX.	118

INTRODUCCIÓN

El siguiente proyecto de grado está orientado a estudiar y caracterizar la integración e implementación del estándar LTE a las redes existentes de la Corporación DIGITEL.

La necesidad de las personas por mantenerse comunicados y poder transmitir información, ha sido uno de los grandes retos del mundo moderno. El desarrollo de las telecomunicaciones, ha originado un gran impacto positivo en todos los sectores productivos de la sociedad, no quedándose atrás la administración pública y privada. En los servicios que prestan los consumidores, se hace evidente esta necesidad. En tal sentido, muchas organizaciones han apostado en mejorar y evolucionar las tecnologías que aplican para satisfacer las necesidades.

Llevar a cabo la descripción y caracterización de la adaptación e implementación de tecnología LTE sobre las redes existentes en la Corporación DIGITEL permitirá abrir paso a la migración entre las antiguas tecnologías y el actual estándar que ha crecido a gran velocidad en todo el mundo. La implementación de LTE logrará transmisiones a altas velocidades y la capacidad de brindar nuevos servicios y aplicaciones a los usuarios.

Para cubrir dichos puntos, es necesario realizar el levantamiento de información de los requerimientos técnicos de la infraestructura de la red LTE actual en la Corporación DIGITEL, evaluar la información de los aspectos técnicos que pueda brindar dicha red, recolección de información referencial y elaborar los pasos necesarios para lograr una adaptabilidad a la nueva tecnología.

La presente investigación se apoya en un diseño mixto, basado en análisis cuantitativos y cualitativos y las técnicas de recolección de datos e información a utilizar son: la revisión documental, la observación y la entrevista informal o no estructurada.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

I.1 Planteamiento del Problema

Actualmente la demanda de servicios y los requerimientos de calidad son factores claves para el desenvolvimiento de nuevas tecnologías, que a su vez se enfrentan a un mercado en constante crecimiento, el cual busca la satisfacción de las necesidades de los usuarios.

LTE representa la tecnología de innovación que brindará una mayor velocidad de transmisión de datos, mediante la cual se podrá acceder a una gran variedad de servicios eficientemente y abre paso al desarrollo de nuevos productos que exigen mayores recursos. Para ello los cambios necesarios para la implementación de LTE sobre la antigua plataforma tecnológica 3G, son mínimos y deben aplicarse gradualmente. Este cambio presenta ciertos inconvenientes como un mercado en donde predominan los dispositivos de la tercera generación y las disponibilidades de espectro de frecuencias, el cual difiere en cada país; de la misma manera el tráfico que maneja LTE es eminentemente IP lo cual excluye el tráfico de voz analógico.

Primordialmente se desea satisfacer las necesidades crecientes de los usuarios, los cuales en Venezuela poseen la tendencia de adquirir mayor cantidad de servicios a velocidades superiores a las ofrecidas por la tercera generación, por lo que la Corporación DIGITEL ansía aunarse al cambio y evolución.

I.2 Objetivos

A raíz del planteamiento del problema y para dar respuesta al título de investigación del estudio, se establecerá el objetivo general y sus objetivos específicos, los cuales se presentan a continuación:

I.2.1 Objetivo general

Estudiar y caracterizar la integración e implementación del estándar de cuarta generación LTE a las redes existentes de la Corporación DIGITEL.

I.2.2 Objetivos específicos

- Realizar informe documental sobre LTE y las topologías aplicables.
- Caracterizar la tecnología de infraestructura y arquitectura de redes LTE existentes en la Corporación DIGITEL.
- Realizar protocolos de prueba en una red LTE piloto, ubicada en las cercanías del edificio Banaven, como usuario terminal.
- Corroborar la viabilidad de LTE en la empresa.
- Encontrar soluciones tipo soporte para la insuficiencia de servicios y equipos.
- Realizar informe sobre estudios del espectro de frecuencias más conveniente a utilizar basándose en las tendencias mundiales de la armonización del espectro LTE.
- Establecer un análisis de fortalezas y debilidades de las tecnologías de cuarta generación, complementarias y competidoras a LTE, para establecer beneficios y aportes a la empresa.
- Indicar los pasos a seguir para lograr la integración de los equipos existentes y servicios ofrecidos por la Corporación DIGITEL al estándar LTE.

I.3 Limitaciones y Alcances

La presente investigación se centrará únicamente en el estudio del estándar LTE y sus características buscando la factibilidad de la integración a los sistemas actuales, sin entrar en la implementación del mismo, sin embargo se realizará un

protocolo de prueba en las oficinas de la compañía para observar el comportamiento de las redes ya implementadas.

La utilización del espectro de radiofrecuencia está sujeta al reglamento de CONATEL.

La disponibilidad de equipos móviles compatibles con la banda de frecuencia LTE regional está sujeta a proveedores y terceros.

Los protocolos de prueba se realizan dentro de una red LAN en el Centro Banaven y sus cercanías.

I.4 Justificación

Mediante un estudio documental de la tecnología LTE se busca conocer los aspectos que definen el estándar, recaudar información realizando protocolos de pruebas, apoyarse en la infraestructura y datos concernientes a las redes de la Corporación DIGITEL para lograr una unificación de la información y desembocar en una conjetura, donde se integre la nueva tendencia tecnológica se establezcan los primeros pasos a seguir para lograr la implementación de la misma. Mediante análisis se pretende exponer las fortalezas, oportunidades y beneficios de la adquisición de "*Long Term Evolution*".

CAPITULO II

MARCO REFERENCIAL

En el presente capítulo se hace una reseña de los conceptos teóricos que sustentan la investigación realizada en este Trabajo Especial de Grado. El marco referencial está dividido en siete secciones: 1) Evolución de la telefonía móvil: donde se hace una reseña desde la primera hasta la cuarta generación de la telefonía móvil; 2) LTE: se detalla la arquitectura del sistema LTE y se definen las propiedades del mismo, así como los servicios que ofrece; 3) Sistema de antenas múltiples: se hace una breve descripción del sistema de antenas MIMO; 4) Técnicas de duplexado: se definen los conceptos de TDD y FDD. 5) Esquemas de acceso: se especifican los esquemas de acceso OFDMA y SC-FDMA; 6) Protocolos: se exponen los distintos protocolos que conciernen al proyecto; 7) LTE en otros países: se realiza un resumen de la situación actual en el resto del mundo.

II.1 Evolución de la telefonía móvil

Para la realización del presente Trabajo Especial de Grado, se estudiaron las cuatro diferentes generaciones de la telefonía móvil y su evolución.

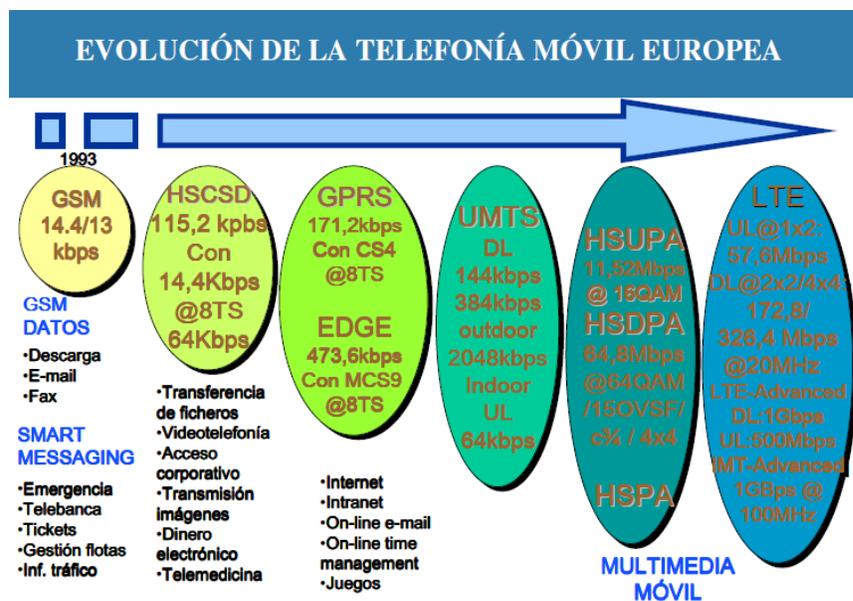


Figura 1. Evolución de GSM. Fuente: Presentación del Profesor Lugo.

II.1.1 1G: la Primera Generación de la Telefonía Móvil

La primera generación de redes móviles fue introducida en los años 70, pero se comercializó en los años 80. Aparecieron los teléfonos celulares, cuya señal estaba basada en sistemas de transmisión análogos con múltiples estaciones de base cercanas unas de las otras. Los servicios ofrecidos eran de muy baja calidad; la transferencia era únicamente para voz y la cantidad de usuarios que el servicio podía ofrecer de forma simultánea estaba limitada.

Entre algunos de los estándares que surgieron con esta tecnología están: NMT (*Nordic Mobile Telephone*), TACS (*Total Access Communications System*) y AMPS (*Advanced Mobile Phone System*) el cual fue el estándar predominante. Estos estándares presentaban problemas de interferencia, seguridad y capacidad.

II.1.2 2G: la Segunda Generación de la Telefonía Móvil

La segunda generación de telefonía móvil hizo su aparición al comienzo de los años 90 con la tecnología GSM (*Global System for Mobile communications*). Esta generación utiliza la modulación digital para mejorar la calidad de la voz, pero los servicios que ofrece la red son limitados. La mayoría de los protocolos de 2G utilizan modulación GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*) y la técnica de acceso TDMA (*Time Division Multiple Access*) para permitir, en teoría, hasta ocho canales simultáneos separados por 200 kHz y con un rehuso de frecuencia 3/9, 4/12, 7/21, 9/27 y 12/36.

Los proveedores de 2G continúan mejorando la calidad de transmisión y la cobertura. El sistema GSM ofrece transmisión de voz y datos a diferentes velocidades, sistemas de encriptación para brindar seguridad y confidencialidad en las comunicaciones. Lamentablemente GSM se convirtió obsoleto porque solamente permitía una transferencia de 9,6 kbps.

Algunas de las tecnologías predominantes de la segunda generación son GSM, IS-136, CDMA (*Code Division Multiple Access*) y PDC (*Personal Digital*

Communications). Estos sistemas de segunda generación usaron bandas de frecuencia de 850 MHz, 900 MHz, 1800 MHz y 1900 MHz.

La evolución inmediata del sistema GSM corresponde al estándar GPRS (*General Packet Radio Service*), considerada como una tecnología 2G, que permite a los usuarios acceder a servicios de MMS (*Multimedia Messaging System*) y servicios de Internet. Este estándar alcanza velocidades de datos en teoría de hasta 114 kbps y provee transferencia de datos a velocidades moderadas utilizando los mismos canales dedicados a voz de GSM pero dedicados a datos. Esta fase utiliza el estándar HSCSD (*High-Speed Circuit Switched Data*), el cual puede utilizar una combinación de hasta cuatro intervalos de tiempo de TDMA para proporcionar una velocidad de transferencia de datos en práctica de 57,6 kbps.

A finales de los 90, surgió una fase intermedia conocida como 2.5G, que ofrece servicios adicionales a los sistemas 2G. Esta tecnología se denomina EDGE (*Enhanced GPRS*), la cual es considerada una evolución de la tecnología GPRS. Alcanza velocidades teóricas de hasta 320 kbps y en la práctica de 140 kbps. También posee un nuevo esquema de modulación de frecuencia utilizando el canal GSM existente.

II.1.3 3G: la Tercera Generación de la Telefonía Móvil

La tercera generación permite a los usuarios realizar transmisiones de datos a altas velocidades y el uso de aplicaciones de audio, imágenes y vídeo de forma inalámbrica. A través del 3G es posible ver vídeo en *streaming* y hacer uso de las videoconferencias, aunque en la práctica este tipo de actividades son restringidas por el alto uso de esta red por parte los usuarios.

Uno de los principales objetivos del 3G era estandarizar las redes en un único protocolo de red global, en vez de utilizar los diferentes estándares que fueron adoptados anteriormente en Europa, Estados Unidos, y otras regiones. El 3G puede

ofrecer velocidades de hasta 2 Mbps, pero sólo bajo las mejores condiciones y en modo estacionario.

El servicio celular 3G conocido como UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) es compatible con las redes GPRS y EDGE. Esta tecnología ofrece servicios de voz, mayores velocidades de transmisión de datos y aplicaciones que soportan el protocolo de Internet IP (*Internet Protocol*). Las bandas en las cuales opera esta tecnología son las de 850 MHz, 900 MHz, 1700 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz, 2100 MHz y 2600 MHz. La tecnología UMTS permite algunos servicios como las videoconferencias, transferencia de archivos pesados, multimedia *streaming*, televisión y juegos en tiempo real. También ofrece la posibilidad de servicios de itinerancia global, con acceso potencial al Internet desde cualquier parte del mundo. Soporta voz y datos al mismo tiempo, a diferencia de las redes CDMA.

Otros servicios celulares 3G conocidos son CDMA 2000-1x y CDMA 2000 1xEV-DO (1x *Evolution-Data Optimized*) los cuales utiliza CDMA como interfaz aire.

Una optimización de la red 3G fue la actualización de la tecnología UMTS a HSDPA (*High-Speed Downlink Packet Access*), la cual también se conoce como 3.5G o 3G+. La tecnología HSDPA presenta una mejora en el enlace de bajada, conocido como *downlink*, haciendo llegar la misma a velocidades de hasta 14 Mbps en sus mejores condiciones. La evolución de la tecnología HSDPA se conoce como HSUPA (*High-Speed Uplink Packet Access*), la cual permite tener una mayor velocidad en el enlace de subida, conocido como *uplink*. Se denomina HSPA (*High-Speed Packet Access*) a la combinación de ambas tecnologías.

II.1.4 4G: la Cuarta Generación de la Telefonía Móvil

La generación actual de telefonía móvil 4G son tecnologías totalmente IP, que han sido creadas con el objetivo de proveer tasas de transmisión hasta unos 100 Mbps en movimiento y 1 Gbps en una estación fija. Simultáneamente, hace uso de las

características de la Calidad de Servicio (QoS) que permitirá al usuario y al proveedor de servicio priorizar el tráfico de datos dependiendo del tipo de aplicación que esté utilizando el ancho de banda.

El despliegue de las redes 4G, mediante la conmutación de paquetes, mantendrá el servicio de voz y a la vez ayudará a mejorar la funcionalidad de las videoconferencias, acceso a videos de alta calidad, juegos en tiempo real, televisión móvil, etc. Se espera también que las redes 4G ofrezcan un ancho de banda mayor a usuarios en movimiento a altas velocidades dentro del área de cobertura, manteniendo el QoS.

Algunas de las tecnologías que definen cuarta generación son LTE-Advanced y WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*). El estándar LTE (*Long Term Evolution*) no es considerado como una tecnología de cuarta generación basándose en las velocidades definidas en el estándar del 3GPP.

II.2 LTE

II.2.1 Estandarización

LTE (*Long Term Evolution*) es una tecnología estandarizada por el 3GPP. Los documentos del 3GPP se estructuran en *Releases*.

Se presenta como la evolución de la tecnología celular UMTS creada en noviembre de 2004, conocida como E-UTRA (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access*) y E-UTRAN (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*).

Algunos de los objetivos de E-UTRA y E-UTRAN son:

- Velocidades de transmisión de pico de 100 Mbps en *downlink* y 50 Mbps en *uplink*, mejorando la velocidad de transmisión obtenible en el extremo de la célula.
- Mejora la eficiencia espectral en un factor 2-4 con respecto al *Release 6*.
- Latencia del plano de usuario en la red de acceso radio inferior a 10 ms.

- Ancho de banda escalable.
- Interoperabilidad con sistemas 3G y sistemas no 3GPP.

(Agusti et al., 2010, p.47).

La primera versión completa de las especificaciones LTE se aprobó en diciembre de 2007. En el 2008 el 3GPP finalizó el *Release 8*, en el cual se encuentra especificado el sistema LTE.

LTE es una tecnología de alta velocidad y baja latencia que comprende GSM, GPRS, EDGE, WCDMA y HSPA. La red LTE presenta mejoras en la interfaz aire en comparación con las redes 3G, utiliza OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) para el *downlink*, basado en esquemas de acceso múltiple y modulación, y utiliza SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) para el *uplink*.

Algunos aspectos positivos de LTE son la disminución de las latencias, eficiencia espectral dada por el rehuso 1 a 1, entre otras. Este sistema utiliza modulación QPSK, 16 QAM y 64 QAM donde a medida que se aleje de la antena se irá disminuyendo el nivel de la modulación para obtener más energía de transmisión por bit. Por otro lado, están las técnicas complementarias de radio como MIMO y el mecanismo de corrección de errores FEC (*Forward Error Correction*).

II.2.2 Arquitectura del sistema LTE

Un sistema LTE está formado por la capa de conectividad IP, llamada EPS (*Evolved Packet System*), la cual está constituida por el equipo de usuario, la red de acceso E-UTRAN y el dominio de paquetes EPC (*Evolved Packet Core*) de la red troncal. Estos proporcionan servicios de transferencia de paquetes IP entre los usuarios y las redes externas.

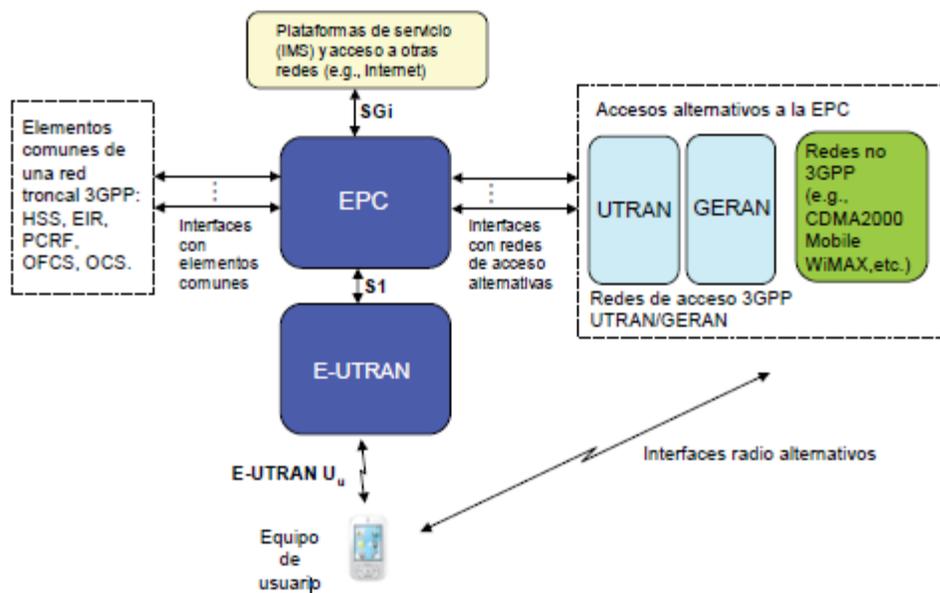


Figura 2. Arquitectura del sistema LTE. Fuente: LTE Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles, 2010.

La interfaz entre E-UTRAN y EPC se llama S1. Y la interfaz de radio entre los equipos de usuario y E-UTRAN se denomina E-UTRAN U_u . La interfaz SGi de la EPC es en donde se realiza la conexión a redes de paquetes IP externas.

Los servicios que ofrece el sistema LTE pueden ser basados en redes IMS (*IP Multimedia Subsystem*), en donde el operador ofrece servicios basados en el protocolo SIP (*Session Initiation Protocol*), o servicios basados en redes no IMS, en donde el operador coloca servicios en su red a las cuales el usuario puede acceder.

El sistema LTE es diseñado para soportar servicios de telecomunicaciones mediante la conmutación de paquetes. De esta forma, la interconexión entre los equipos se realiza mediante tecnologías de red basadas en IP.

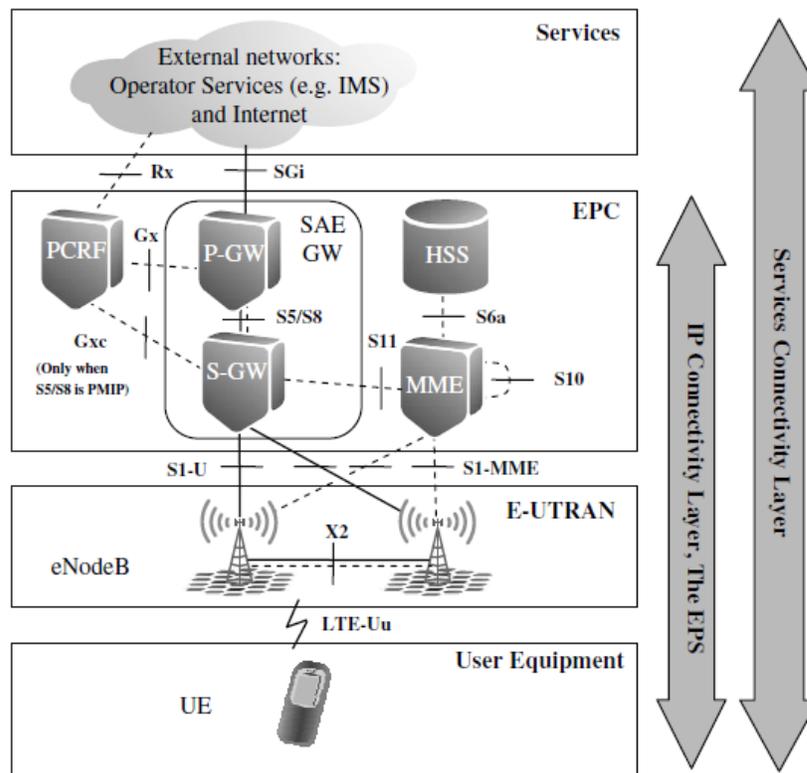


Figura 3. Componentes e interfaces de la red LTE. Fuente: LTE for UMTS, OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access, 2009.

En la Figura 3 se puede observar la arquitectura de una red LTE y todos los elementos que la conforman, así como las interfaces de la misma.

II.2.2.1 EPC (*Evolved Packet Core*)

El diseño de la red troncal EPC ha sido concebido principalmente para proporcionar un servicio de conectividad IP (evolución del servicio GPRS) mediante una arquitectura de red optimizada que permite explotar las nuevas capacidades que ofrece la red de acceso E-UTRAN. Asimismo, otro factor clave considerado en el diseño de la arquitectura de la red troncal ha sido la posibilidad de acceder a sus servicios a través de otras redes de acceso tanto 3GPP (UTRAN y GERAN) como fuera del ámbito del 3GPP (cdma2000, WiMAX, 802.11). (Agusti et al., 2010, p.78).

Toda la red está basada en protocolos IP para permitir la interconexión entre redes fijas e inalámbricas. El EPC también es conocido como SAE (*System Architecture Evolution*).

II.2.2.1.1 Entidades de red que conforman el EPC

- **MME (*Mobility Management Entity*)**

La entidad de administración de la movilidad (MME), es el componente de la EPC que se encarga principalmente de la señalización y funciones del plano de control que gestiona el acceso de red y la movilidad de los usuarios. Por lo tanto, no transporta paquetes IP con tráfico de datos de usuarios. La ventaja de tener una red con una entidad de señalización separada, es que la capacidad de la red para señalización y tráfico crecen independientemente. Las funciones del MME son:

- Administrar los parámetros de seguridad.
- Autenticar las identidades de los equipos de usuario y autorizar el acceso a la red.
- Selección de los P-GW y S-GW.
- Permitir al operador manejar el tráfico de usuario y la señalización (Protocolos de señalización).
- Señalización entre nodos de la red central para la movilidad entre EPS y las redes 3GPP.
- Gestión de movilidad en usuarios en modo *idle*.
- Gestión de los estados de conexión de los usuarios.
- Funciones de gestión de *bearers*.

- **S-GW (*Serving Gateway*)**

El servidor de puerta de enlace es el nodo que actúa como enlace entre E-UTRAN y la red troncal EPC. Para cada terminal de usuario existe un S-GW único asignado en cada momento. Entre sus funciones están:

- Gestión de movilidad con las redes de acceso 3GPP.
- Enviar el tráfico móvil a otras redes IP.
- Almacenamiento temporal de paquetes IP.
- Enrutamiento y redirección de paquetes.
- Proporcionar al usuario la información del tráfico.

- **P-GW (*PDN Gateway*)**

Es el nodo que mediante una conexión permite acceder a redes de datos públicas. Puede existir más de un P-GW asignado a cada usuario. Algunas de sus funciones son:

- Brindar soporte para la interconexión entre las redes 3GPP y redes no 3GPP.
- Aplicación de las reglas de uso de la red.
- Filtrado de paquetes por usuario.
- Actúa de interfaz entre la red de acceso y las redes de paquetes IP.
- Control de tarificación.
- Asignación de la dirección IP a los usuarios.

- **HSS (*Home Subscriber Server*)**

Se dice que es una evolución del HLR (*Home Location Register*) de GSM, pues contiene toda la información de los usuarios de la red. Almacena la información de suscripción y los datos de autorización para que el usuario acceda al sistema y pueda hacer uso de los servicios dependiendo de su contrato de suscripción.

- **PCRF (*Policy and Charging Rules Function*)**

Esta entidad detecta los flujos de servicios y luego se cumple con la política de tarificación. Para aplicaciones que requieren control de tarificación, se utiliza un elemento de red denominado AF (*Applications Function*). Las funciones del PCRF son:

- Autorizar a los recursos de calidad de servicio (QoS).
- Control de los flujos de servicios de datos: detección, *gating*, calidad de servicio y tarificación.
- Decisiones dinámicas sobre políticas en los flujos de datos.

El nodo PCRF no forma parte del EPC en la nueva arquitectura, sino que está definido en el *Release 7* del 3GPP.

II.2.2.2 E-UTRAN

La arquitectura de la red de acceso se compone de una única entidad de red denominada *Evolved NodeB* (eNB) que constituye la estación base de E-UTRAN. Así pues, la estación base E-UTRAN integra toda la funcionalidad de la red de acceso, a diferencia de las redes de acceso de GSM y UMTS compuestas por estaciones base (BTS, NodoB) y equipos controladores (BSC y RNC). (Agusti et al., 2010, p.62).

La E-UTRAN es también denominada como la interfaz de aire de LTE, se encarga de interconectar los equipos de usuario con la red. Está constituida por nodos eNB conectados mediante las interfaces X2.

II.2.2.1.1 Entidades de red que conforman el E-UTRAN

- ***Evolved NodeB* (eNB)**

Es el nodo que conforma el E-UTRAN, el cual actúa como una radio base que se ubica con las antenas de radio. Se encarga de crear un enlace entre el equipo de usuario con el EPC para transmitir los paquetes de datos IP y mensajes de señalización. Su función principal es la gestión de los recursos radio; también realiza la selección dinámica del MME y el enrutamiento de los datos hacia el S-GW. Es el encargado de realizar la compresión de la cabecera, el cifrado y la entrega de los paquetes IP.

II.2.2.1.2 Comparativa entre E-UTRAN y UTRAN

La principal diferencia al comparar la arquitectura E-UTRAN con UTRAN es que la red de acceso UTRAN se basa en una arquitectura jerárquica. En la Figura 4 se observa la red troncal LTE y la red troncal UMTS.

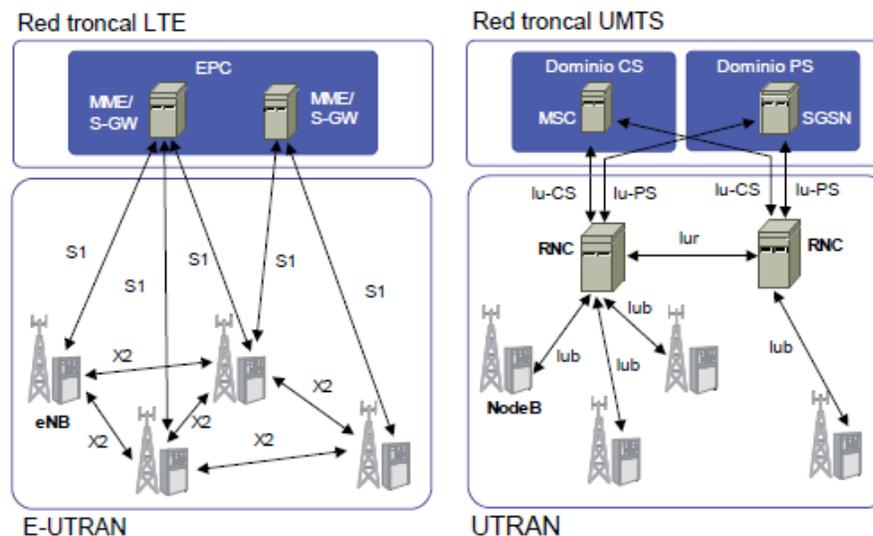


Figura 4. Comparativa de la arquitectura de red de E-UTRAN y UTRAN. Fuente:
LTE Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles, 2010.

En la red de acceso de la arquitectura UTRAN las estaciones base se encargan de la transmisión radio y es controlado por equipos remotos. Las interfaces entre las estaciones base y los equipos de control se llaman Iub, y la interfaz entre los equipos de control se denominan Iur.

Por otro lado, en la arquitectura E-UTRAN, la voz es tratada como un servicio de datos de alta prioridad. Se elimina el RNC y sus funciones se delegan al eNB en su mayoría. Las interfaces entre los eNBs se denominan X2 y las interfaces entre los eNB y el núcleo EPC se llaman S1.

II.2.2.3 UE (*User Equipment*)

Son todos aquellos equipos que le otorgan al usuario la capacidad de conectarse con el sistema LTE. Estos dispositivos poseen un módulo de identificación

denominado USIM (*Universal Subscriber Identity Module*), el cual es utilizado para identificar y autenticar a los usuarios en la red.

II.2.2.4 Interfaces de red

- **Interfaz radio (U_u)**

Permite la transferencia de información por el canal radio entre el equipo usuario (UE) y el eNB. Esta interfaz soporta tres tipos de transferencia: transferencia de señalización de control dedicada entre el UE y el eNB, transferencia de paquetes IP y difusión de señalización de control (*broadcast*).

- **Interfaz eNB – EPC (S1)**

Se divide en dos interfaces para realizar la conexión del eNB con dos nodos diferentes de la red troncal, estas son:

- S1-MME (S1-C): sustenta el plano de control, que incluye la señalización y los parámetros necesarios para establecer una llamada. Soporta un conjunto de funciones y procedimientos de control entre eNBs y el MME.
- S1-U (S1-UP): soporta al plano de usuario, abarcando el *payload* y las informaciones referentes a los detalles del usuario. Proporciona un servicio de transferencia de datos entre el eNB y el S-GW.

- **Interfaz eNB – eNB (X2)**

Conecta a los nodos eNB para transmitir mensajes de señalización y datos de usuario entre los mismos, en especial cuando ocurre el proceso de *handover*, todo esto sin garantías de entrega, soportes de mecanismos de control de errores, ni controles de flujo.

- **Interfaz MME - SGSNs (S3)**

Permite el intercambio de información de usuario para la movilidad del sistema de las redes de acceso 3GPP en estado activo y/o inactivo. Está basado en el punto de referencia Gn definido entre SGSNs.

- **Interfaz S-GW - SGSNs (S4)**

Provee al plano de usuario del enlace a los equipos S-GW y núcleo del GPRS. Está basado en el punto de referencia Gn definido entre SGSN y GGSN.

- **Interfaz P-GW – Redes Externas (SGi)**

Se realiza la interconexión entre el P-GW de la red LTE y la red externa de paquetes de datos IP. Soporta redes IP versión 4 y versión 6.

- **Interfaces P-GW – S-GW (S5 y S8)**

Permiten la transferencia de paquetes entre el P-GW y el S-GW.

- S5: es utilizada para relocalizar el equipo de usuario cuando ambos *gateways* pertenecen a la misma red.
- S8: es un punto de referencia en casos de itinerancia (*roaming*). Suministra los planos de usuario y de control entre el S-GW de la red visitante y de la red local.

- **Interfaz MME – MME (S10)**

Es utilizada para llevar a cabo la interconexión entre los MME y para la relocalización y transferencia de información entre los mismos. Abarca toda la información relacionada a servicios, gestión de movilidad, datos de seguridad, características del terminal, entre otros.

- **Interfaz MME – S-GW (S11)**

Realiza la interconexión entre el MME y el S-GW. También da soporte al proceso de reubicación del S-GW. Permite la supresión, creación, edición y cambio de los servicios que poseen los terminales asignados en la red troncal LTE.

- **Interfaz HSS – MME (S6a)**

Permite la transferencia de datos entre el HSS y el MME para autenticar y suscribir al usuario y permitirle el acceso a la interfaz aire. Da soporte a funciones tales como: mantenimiento de la información de gestión relacionada a la localización de los terminales, autorización de los datos y perfiles del usuario empleando la base de datos del HSS, la autenticación dada en el MME.

II.2.3 Soporte de itinerancia (*roaming*)

En telefonía móvil, la itinerancia es la capacidad que posee un dispositivo móvil de conectarse y acceder a los servicios de la red móvil en cualquier área de servicio de una empresa diferente a la que el cliente está suscrito; asimismo ofrece al cliente la libertad de moverse de una zona de cobertura a otra. Las diferentes empresas de telecomunicaciones poseen acuerdos de itinerancia (ya sean internacionales o nacionales) para definir cómo se realiza la conexión entre las mismas y brindar acceso al cliente. Estos acuerdos generan un crecimiento de las capacidades de ofrecer cobertura por parte de una determinada operadora móvil y a su vez, atraen a más empresas a unirse al negocio de las comunicaciones móviles.

En un libro de 2008, Dahlman, Parkvall, Sköld y Beming mencionan que en las redes de tercera generación, las funcionalidades de itinerancia del núcleo de la red son las que permiten al usuario el uso de la red de otra operadora. La itinerancia se apoya tanto en el dominio de conmutación de circuitos como en el dominio de conmutación de paquetes. El acuerdo de las bandas de frecuencia asignadas a la tercera generación entre las regiones, significa que no existe una banda única que pueda ser utilizada para la itinerancia internacional. Pero luego se definieron un

mínimo de bandas que pueden ser utilizadas para la itinerancia internacional. De esta manera, los equipos móviles multi-banda pueden proveer un servicio eficiente de itinerancia mundial para 3G.

En el sistema LTE, la itinerancia es apoyada por el EPC. Dependiendo de la política del operador, la dirección IP puede ser asignada por el EPC local (*roaming* tradicional), o por el EPC visitado (*local break out*).

El sistema LTE especifica tres posibles configuraciones para la implementación de un servicio de itinerancia. Las diferentes configuraciones dependen de qué pasarela P-GW se utiliza para encaminar el tráfico con la red externa y de la capacidad de proporcionar acceso a los servicios propios del operador matriz. Las tres configuraciones son:

- Encaminamiento de tráfico a través de la red matriz, con acceso a los servicios de la red matriz.
- Encaminamiento de tráfico a través de la red visitada, con acceso a los servicios de la red visitada.
- Encaminamiento de tráfico a través de la red visitada, con acceso a los servicios de la red matriz.

(Agusti et al., 2010, p.100).

Uno de los principales problemas para lograr el *roaming* internacional en una red LTE es la falta de homologación de frecuencias en el mundo para hacer el *roaming* fácil y económico.

II.2.4 Servicios ofrecidos por LTE

LTE ofrece servicios, aprovechando la creciente compatibilidad IP con la plataforma OTA (*Over The Air*) ajenos a las capacidades del dispositivo; brindando un valor agregado a los beneficios que recibe el usuario. De la misma manera esto beneficia a las operadoras ya que se le abren las puertas a nuevos horizontes de negocio y de ofrecimiento de servicios, entre los cuales están:

- **Sondeos o *polling*:** se basa en la plataforma OTA basada en IP que permita sondeos continuos como es la búsqueda de actualizaciones en el sistema y la habilitación de un canal de alta disponibilidad, sin la necesidad de utilizar una transmisión de señal.
- **IMEI *Lock* y activación de tarjetas SIM:** activación, desactivación y control de parámetros de la tarjeta SIM a distancia y mediante canales de alta velocidad y disponibilidad.
- ***Dual/Multi International Mobile Subscriber Identity (IMSI)*:** brinda la facilidad de cambiar perfiles de usuarios en un dispositivo sin la necesidad de cambiar la UICC a voluntad del usuario o de la operadora, aporta beneficios en la misma índole al servicio de *roaming* dando la posibilidad de cambio a perfiles internacionales de forma automática.
- ***Device discover*:** mantiene en relación el código IMEI de un dispositivo con la información actualizada proveniente de la SIM, lo cual permite un mayor monitoreo del usuario y brinda la oportunidad de ofrecer nuevos servicios a medida que el usuario incorpora su número a nuevos dispositivos más avanzados.

II.2.4.1 Calidad de Servicio (QoS)

En un sistema de red, el QoS (*Quality of Service*) es la capacidad que tiene la red para ofrecer mejoras en el servicio de cierto tipo de tráfico. La arquitectura de LTE soporta un “*hard QoS*” con calidad de servicio de punta a punta y un *bit rate* garantizado (GBR) para los radio portadores.

Los flujos de QoS son llamados portadores EPS, los cuales manejan el tráfico en el plano usuario y el P-GW, y provee soporte para los TFT (*Traffic Flow Templates*). Para cada portadora LTE se asigna un IP QoS.

Uno de los mecanismos mediante el cual se ofrece QoS, es establecer una regulación para garantizar una velocidad de transmisión de datos. Esto se logra mediante los parámetros de calidad de servicio:

- **GBR (*Guaranteed Bit Rate*):** identifica la tasa de bits que se garantizará al portador.
- **NGBR (*Non-Guaranteed Bit Rate*):** establece las conexiones IP.
- **QCI (*QoS Class Identifier*):** relacionado con los valores de prioridad, retardo y pérdida de datos.
- **ARP (*Allocation and Retention Priority*):** hace referencia a la prioridad de datos en contraste con otros y proporciona bases para el control en situaciones de congestión.
- **MBR (*Maximum Bit Rate*):** referente a la tasa máxima de bits del portador.
- **AMBR (*Aggregate Maximum Bit Rate*):** señala la tasa máxima a la cual un usuario puede realizar y mantener una conexión PDN (ya que un solo portador puede tener muchos flujos IP).

Un ejemplo para GBR son: VoIP, video llamada, *streaming*, juegos a tiempo real, entre otros. Y para NGBR: aplicaciones con TCP tales email, descarga de archivos, navegación en Internet.

II.2.5 Comparación de las tecnologías 3G con 4G

En la Tabla 1, se hace una comparación de las tecnologías 3G (UMTS, HSPA y HSPA+) con las tecnologías 4G (WiMAX y LTE).

	UMTS (R.99)	HSPA	HSPA+	WiMAX	LTE
Acceso de Radio	W-CDMA	W-CDMA	W-CDMA	OFDMA DL/UL	OFDMA DL SC-FDMA UL
Ancho de Banda	5 MHz	5 MHz	5 MHz	5, 7, 10 MHz	Escalable desde 1.4 a 20 MHz

	UMTS (R.99)	HSPA	HSPA+	WiMAX	LTE
Modulación UL	BPSK	QPSK	QPSK 16QAM	QPSK 16QAM	QPSK 16QAM
Modulación DL	QPSK	QPSK 16QAM	QPSK 16QAM 64QAM	QPSK 16QAM 64QAM	QPSK 16QAM 64QAM
Estructura de Red	NodeB + RNC	NodeB + RNC	NodeB + RNC	WBS hacia ASN- GW	eNB hacia EPC
Sistema de Antenas	Diversidad Rx	Diversidad Rx	2x2 MIMO eHSPA NodeB	2x2 MIMO 4x2 Beamforming	2x2 MIMO 4x4 MIMO
Servicios	PS y CS	PS y CS	PS compatible con CS	PS	PS
Transporte	ATM/Mixed ATM & IP	ATM/Mixed ATM & IP	Posible Todo IP	Todo IP	Todo IP

Tabla 1. Comparación de tecnologías 3G y 4G. Fuente: Propia.

II.3 Sistema de antenas múltiples

II.3.1 MIMO

LTE es el primer sistema de comunicación móvil en tener el sistema de antenas de transmisión MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) diseñado desde un principio como una parte integral del sistema original. Con este sistema de antenas múltiples se aprovecha la propagación multicamino para disminuir los errores, obtener un mejor alcance y generar una mayor confiabilidad en el enlace.

Con el uso de las antenas múltiples (MIMO), se logra:

- Mayor capacidad de usuarios en el sistema.
- Incremento del *throughput*.
- Aumento de la eficiencia espectral.

- Aumento de la tasa de transmisión de datos.
- Robustez ante las interferencias por multicamino.

Algunas de las ventajas que presenta el empleo de MIMO para las operadoras son el aumento de la capacidad, el rango y la velocidad de transmisión de una forma económica.

Entre las configuraciones que puede tener MIMO están:

- **SISO (*Single Input Single Output*):** en este tipo de configuración tanto el transmisor como el receptor tienen solo una antena. Es la tecnología de antenas más simple, sin embargo, es vulnerable a los problemas causados por los efectos multicamino.
- **MISO (*Multiple Input Single Output*):** en este caso el transmisor tiene varias antenas para la transmisión y una para la recepción.
- **SIMO (*Single Input Multiple Output*):** en esta configuración el transmisor tiene una antena para la transmisión y varias para la recepción.
- **MIMO (*Multiple Input Multiple Output*):** se relaciona la capacidad de transmisión con el número de antenas instaladas y se emplean varias antenas en el transmisor y varias en el receptor.

Para el *downlink* en el sistema LTE, se requiere la configuración de antenas MIMO 2x2, la cual consiste en dos antenas transmisoras en el eNB y dos antenas receptoras en el UE. El sistema también soporta hasta 4x4 MIMO en el *downlink* para alcanzar valores picos de velocidad mayores a 200 Mbps.

El primer *Release* del sistema de LTE no soporta la multiplexación espacial del SU-MIMO (*Single User MIMO*) para el *uplink*. Sin embargo, son permitidas las operaciones MU-MIMO (*Multi User MIMO*) en donde dos o más UE compartan la misma banda de frecuencias.

II.4 Técnicas de duplexado

LTE soporta dos tipos de comunicación:

- **FDD (*Frequency Division Duplexing*)**: en este modo el transmisor y el receptor funcionan a diferentes frecuencias por lo tanto permite la transmisión simultánea de información. Según Lugo (2011), se establece un enlace para el *uplink* y otro para el *downlink*, separados por una guarda de duplexado.



Figura 5. FDD. Fuente: Presentación del Profesor Lugo.

- **TDD (*Time Division Duplexing*)**: en este modo el *uplink* y el *downlink* funcionan en una misma frecuencia por lo que permite al transmisor y al receptor realizar la transmisión de información en tiempos diferentes, haciendo posible la configuración variable del número de *slots*. Según Lugo (2011), se permite asignar recursos de manera simétrica, lo que lleva a un uso eficaz del espectro y aporta los siguientes beneficios:

- Permite aplicar control de potencia en lazo abierto.
- Emplear en el emisor, técnicas de pre-distorsión de señal; ya que la transmisión se efectúa en la misma frecuencia y la respuesta del canal sobre ambos enlaces es similar.

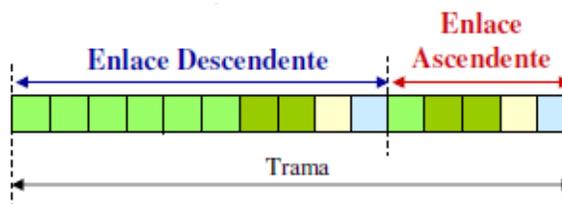


Figura 6. TDD. Fuente: Presentación del Profesor Lugo.

II.5 Esquemas de acceso

LTE utiliza esquemas de acceso que le permiten reducir la interferencia y aumentar la capacidad de la red, los cuales son:

II.5.1 OFDMA

OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) es utilizado en el *downlink* pues permite lograr altos picos de velocidad de datos, pero no es utilizado en el *uplink* debido a que se compromete la eficiencia en potencia y por consiguiente la vida útil de las baterías.

Ventajas:

- Diversidad multiusuario.
- Diversidad de frecuencia.
- Robustez frente a la propagación multicamino.
- Mayor eficiencia espectral.
- Elevado grado de utilización de la banda asignada.
- Sencillez de implementación en el dominio digital.

II.5.2 SC-FDMA

SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) es una técnica de transmisión es utilizada en el *uplink*, y ahorra el uso de amplificadores de potencia en el equipo del usuario. Permite una mayor duración de las baterías de los equipos terminales de usuario. Se considera como una versión de OFDMA que se puede utilizar en los modos FDD y TDD.

II.6 Protocolos

II.6.1 Protocolos del sistema LTE

La señalización que se maneja en las interfaces U_{ii} , S1 y X2 del E-UTRAN se puede observar de manera general como la interpolación entre la capa física y la capa de red, y la información de los planos de usuario y de control.

El plano de usuario abarca los protocolos utilizados para el envío del tráfico (paquetes IP) correspondiente a los servicios a los que acceden los terminales a través de la red. El plano de control se refiere a los protocolos necesarios para sustentar las funciones y procedimientos en las diferentes interfaces. (Agusti et al., 2010, p.71).

A continuación se describen los protocolos referentes a cada interfaz.

II.6.1.1 Protocolo de la interfaz U_{ii} o interfaz radio

Está constituido por la interfaz encargada de transportar los paquetes IP entre el UE y el eNB. A su vez está conformada por la capa física y la capa de enlace.

La capa de enlace está dividida en:

- **PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*):** servicio de transferencia que se encarga de la compresión y descompresión de la cabecera IP, transmisión de la data de usuario bajo parámetros de confidencialidad e integridad aplicando cifrado de la información, identificar el paquete IP mediante secuenciación que permite una entrega ordenada y detectar duplicados de los paquetes.
- **RLC (*Radio Link Control*):** se basa en la fidelidad de los paquetes mediante mecanismos ARQ (*Automatic Repeat ReQuest*), que utiliza notificaciones de recibo y tiempos de espera para lograr una transmisión confiable; concatenación, segmentación de paquetes según sea el tamaño de los bloques

de transporte, re-ensamblado, detección de duplicados y detección/recuperación de errores en el protocolo y descarte de SDU (*Service Data Unit*).

- **MAC (*Medium Access Control*):** se encarga del control del acceso al canal de radio. Entre sus funciones está la corrección de errores empleando HARQ (*Hybrid ARQ*), que combina el código de corrección hacia adelante a altas velocidades con ARQ; el soporte de funciones de *scheduling* entre equipos de usuarios implementando un sistema de prioridades, mapeo entre canales lógicos y canales transporte, multiplexación y de-multiplexación de los PDU perteneciente al RLC, reporte de medidas del volumen del tráfico. Existe una entidad MAC por cada celda.

La capa física se encarga de la transmisión de los datos a través de la interfaz de radio y según la dirección, el enlace se basa en un esquema diferente siendo SC-FDMA para el *uplink* y OFDMA para el *downlink*. Entre sus funciones se encuentran la codificación del canal, modulación y el tratado referente a los equipos y técnicas de antenas múltiples.

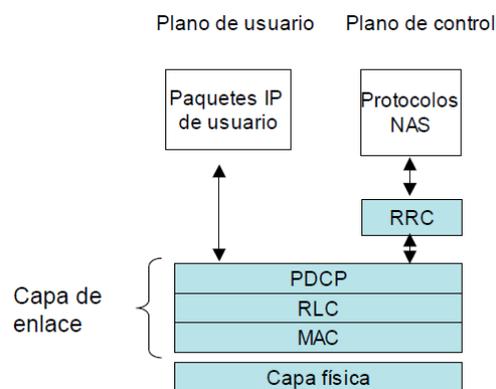


Figura 7. Protocolos de la interfaz de radio. Fuente: LTE Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles, 2010.

Posterior a las capas se encuentra la diferenciación por planos, donde cada uno comprende una serie de características y protocolos distintos, correspondientes a

la capa de red. Para el plano de control del nivel de red encontramos los siguientes protocolos, según Agusti et al., (2010):

- **RRC (*Radio Resource Control*):** establece las conexiones de control entre el UE y el eNB. Entre sus funciones están: la gestión de los servicios de portadores de radio que incluye la señalización para la liberación, establecimiento y modificación de dichos portadores; soporte a funciones de movilidad, relacionada con la señalización del *handover*; *broadcasting* (envío de los parámetros de red) que incluye la difusión de la información del sistema relacionada al AS (*Access Stratum*) y al NAS (*Non-access stratum*), notificaciones de los equipos terminales que no poseen una conexión con el RRC propia, gestiones de la calidad de servicio.
- **Protocolo NAS:** es un protocolo que se transmite dentro del encapsulado de los datos de RRC, se ubica entre el UE y el MME del EPC. Participa en la autenticación, autorización, gestión de la movilidad de los terminales que no poseen conexión establecida con el RRC y gestión de los servicios portadores de la red EPS.

II.6.1.2 Protocolos en las interfaces S1 y X2

Se emplea una división en capas para separar la estructura de los protocolos, esto se debe a la necesidad de diferenciar las funciones que dependen únicamente del sistema o tecnología de comunicación como es LTE y UMTS, de aquellas funciones referentes a la tecnología empleada para el transporte como IP y ATM. Como lo establecido por Agusti et al. (2010), se encuentra la capa de red de radio o RNL (*Radio Network Layer*) y la capa de red de transporte o TNR (*Transport Network Layer*).

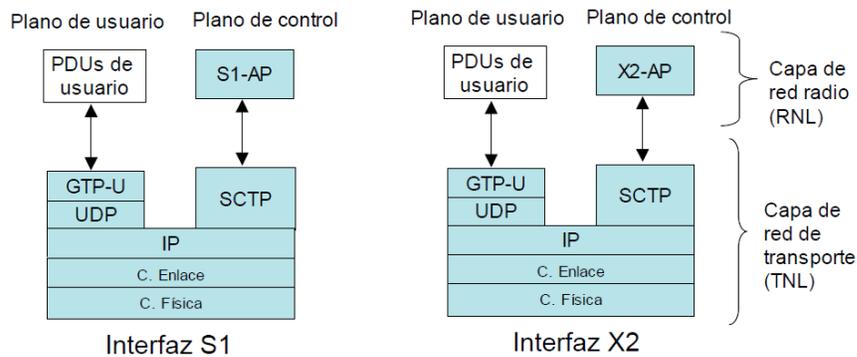


Figura 8. Protocolos en las interfaces S1 y X2. Fuente: LTE Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles, 2010.

Ambas interfaces emplean características comunes concernientes a los planos en cuestión. Estas características son referidas a los siguientes protocolos:

Sobre el plano de usuario cabe destacar que las interfaces S1 y X2 no poseen mecanismos de entrega garantizada, control de errores o flujo para el envío de información procedente del UE. Para este plano se tiene:

- ***GPRS Tunneling Protocol – User Plane (GTP-U)***: se encarga del envío de paquetes multiplexados referentes a la información de varios usuarios. Este protocolo se maneja sobre UDP/IP.

Para el plano de control:

- ***Stream Control Transmission Protocol (SCTP)***: se caracteriza por ser un protocolo de transporte sobre redes IP que deriva características de TCP implementando mejores características como robustez y versatilidad en la transferencia de distintos tipos de información, control de flujo, soporte para *multihoming*, que brinda envío a través de múltiple caminos mediante la asignación de múltiples direcciones IP a los nodos; también proporciona control sobre la gestión de la conexión, incorpora soporte para *multistreaming* y la estructuración del envío de la información se basa en mensajes en lugar de cadenas de bytes como es el caso de TCP.

Para el plano de control de la interfaz S1 denominada, S1-C se presenta el siguiente protocolo:

- **S1 – Application Part (S1-AP):** soporta procedimientos para el establecimiento, modificación y liberación de los recursos de los servicios portadores de la interfaz de radio y sobre la misma S1; *handover* de eNBs en caso de ausencia de interfaz X2, procedimientos de aviso o *paging*, envío de información referente a señalización entre MME y eNB.

Respecto al plano de control correspondiente a la interfaz X2, se halla el protocolo:

- **X2 – Application Part (X2 – AP):** soporte de *handover* entre eNBs, a través del plano de control se lleva a cabo la transferencia desde un eNB a otro, la información correspondiente a los servicios portadores de radio que tiene asignado el usuario, asimismo lleva a cabo el control de los mecanismos de transferencia de paquetes IP en el plano de usuario. Otra función es indicar el estado de carga del eNB para llevar a cabo las funciones de gestión de recursos, los eNBs que poseen celdas vecinas pueden transferirse información entre ellos.

II.6.1.3 Plano de usuario entre UE y EPC

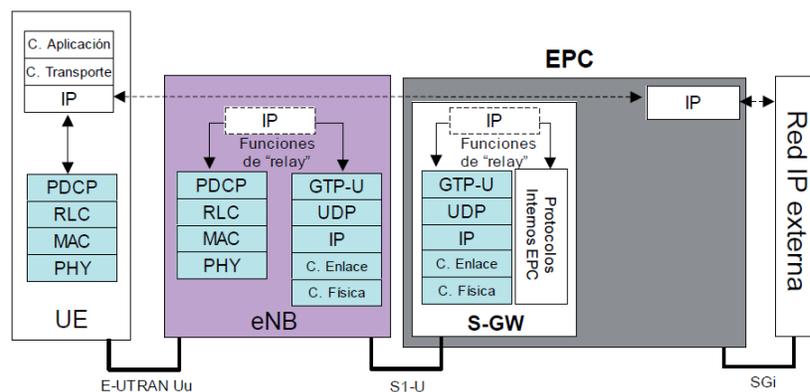


Figura 9. Protocolos del plano usuario UE-EPC. Fuente: LTE Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles, 2010.

Señalado por Agusti et al. (2010), esta interfaz se centra en el envío de paquetes IP que transportan la información que el usuario utiliza, es decir, servicios de voz, video, datos. En la Figura 9 se observa el recorrido de los paquetes entre el UE y los elementos del EPC, donde se destacan las funciones de *relay* que se efectúan en el eNB, específicamente entre la torre de protocolos de la interfaz de radio (U_u) y la torre de protocolos de la interfaz S1-U. La función del eNB se limita a la transferencia de información entre las dos interfaces atendiendo a los servicios portadores establecidos, de modo que es ajeno al encaminamiento desde el punto de vista del contenido de las cabeceras IP perteneciente a la información del usuario.

II.6.1.4 Plano de control entre UE y EPC

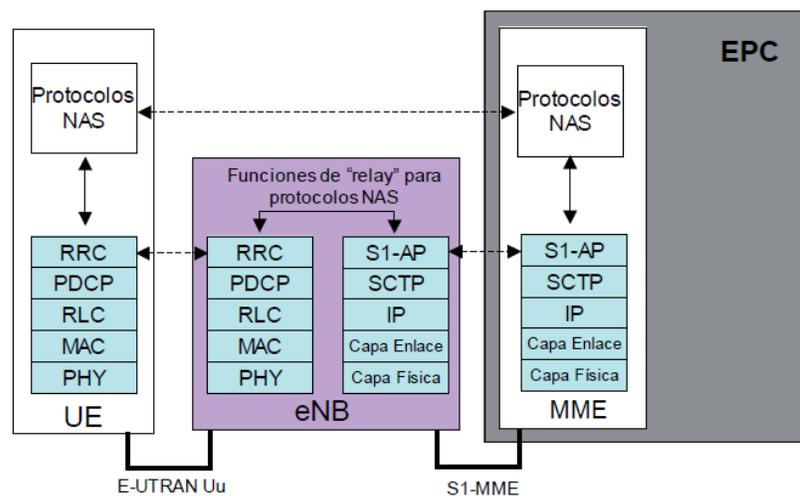


Figura 10. Protocolos del plano de control entre UE-EPC. Fuente: Fuente: LTE
Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles, 2010.

Se destaca el envío de la señalización NAS entre el UE y el EPC, dicha transmisión es dada en encapsulados dentro del paquete de información correspondiente al RRC en la interfaz U_u y de la misma manera se encuentra dentro de los mensajes del protocolo S1-AP correspondiente a la interfaz S1-C. Se destaca de igual forma que en el plano de usuario, las funciones de *relay* entre las pilas de protocolo para que se cumpla la transmisión completa.

II.6.2 Protocolo IP

El protocolo IP es la pieza clave sobre la que se construye toda la Internet. Define una red de conmutación de paquetes en la que la información a transmitir es fragmentada en trozos o paquetes. Cada paquete es enviado con la dirección del ordenador donde ha de ser entregado y, de forma similar a como funciona un sistema postal, cada paquete viaja independientemente de los demás por la red hasta alcanzar su destino. Los equipos que interconectan las distintas piezas (las distintas redes) y toman las decisiones de por donde es mejor enviar cada paquete IP en base a su dirección de destino, se denominan enrutadores o *routers*. La principal cualidad de los paquetes IP es que son capaces de utilizar cualquier medio y tecnología para su transporte, saltando de *router* a *router* hasta llegar a su destinatario. (Sanz, 2002).

Para el envío de paquetes de datos, es necesaria la utilización de diversos protocolos tanto de señalización como de transporte, sabiendo que los datos no son capaces de encontrar su propio camino de comunicación hasta su punto de destino.

II.6.2.1 Protocolo TCP (*Transmission Control Protocol*)

El protocolo de control de transmisión, es uno de los principales protocolos de la capa de transporte del modelo TCP/IP. En el nivel de aplicación, posibilita la administración de datos que vienen del nivel más bajo del modelo, o van hacia él, (es decir, el protocolo IP).

Cuando se proporcionan los datos al protocolo IP, este los agrupa en datagramas IP, fijando el campo del protocolo en seis (para que sepa con anticipación que el protocolo es TCP). TCP es un protocolo orientado a conexión, es decir que permite que dos máquinas que están comunicadas controlen el estado de la transmisión.

II.6.2.2 Protocolo FTP (*File Transfer Protocol*)

El protocolo FTP es un protocolo basado en la arquitectura cliente-servidor para la transferencia de archivos entre sistemas conectados a una red. FTP utiliza TCP como protocolo de transporte. El cliente puede descargar o subir archivos a un servidor desde un equipo de usuario.

Un servidor FTP es un programa especial que se ejecuta en un equipo servidor, y un cliente FTP es un *software* que se instala en un equipo de usuario con la finalidad de permitir el intercambio de datos con el servidor.

II.6.2.3 Protocolo UDP (*User Datagram Protocol*)

Es un protocolo que permite el envío de datagramas a través de la red sin que se haya establecido previamente una conexión, ya que el propio datagrama incorpora suficiente información de direccionamiento en su cabecera. No tiene confirmación, ni control de flujo, por lo que los paquetes pueden adelantarse unos a otros; y tampoco se sabe si ha llegado correctamente, ya que no hay confirmación de entrega o de recepción. (Pergamino Virtual, 2001).

II.7 LTE en otros países

En el Apéndice A se mencionan los países en donde LTE está implementado o están planificando su implementación. También se observa específicamente la banda de frecuencia en la que trabaja cada operadora.

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

En el marco metodológico de la presente investigación se propone el estudio y caracterización de la integración e implementación del estándar LTE (*Long Term Evolution*) a las redes existentes de la Corporación DIGITEL C.A. Describe un conjunto de métodos, técnicas e instrumentos que se emplearán en la recolección de los datos, así como la presentación y análisis de los mismos, con la finalidad de cumplir con el propósito general de la investigación planteada. El enfoque de la metodología de la investigación se basa en el libro “Metodología de la Investigación” de Hernández, Fernández y Baptista (2006).

III.1 Diseño y tipo de investigación

La presente investigación se basa en un enfoque mixto, la cual se fundamenta en los enfoques cualitativos y cuantitativos para brindar solución al planteamiento del problema y cumplir con los objetivos establecidos.

Se eligió este tipo de investigación pues aporta las siguientes bondades según Hernández, Fernández y Baptista (2006):

- “Se logra una perspectiva más precisa del fenómeno sustentándose en las fortalezas de cada método y no en sus debilidades” (Todd y Lobeck, 2004, p.755).
- “Se busca evitar la investigación tradicional que posea un solo enfoque, aportando diferentes puntos de vista que generan datos más completos” (Hernández et al., 2006, p.756).
- “Aumenta la dimensión de la investigación y conlleva a un entendimiento mayor y más rápido” (Morse, 2002; Niuman, Ride, Nour, Niuman y De Marco, 2002; y Mertens, 2005; p.756).

Se trabajará con los enfoques cuantitativos y cualitativos de forma paralela, aplicando el método que más se ajuste para la recolección e interpretación de los datos.

El enfoque cuantitativo se basa en un diseño no experimental: “estudio que se realiza sin la manipulación deliberada de variables y en los que sólo se observan los fenómenos en su ambiente natural para después analizarlos” (Hernández et al., 2006, p.687). Dentro de esta categoría se clasifica la investigación como transeccional “Investigaciones que recopilan datos en un momento único” (Hernández et al., 2006, p.208). A su vez, los diseños transeccionales se dividen en tres según su alcance: exploratorio, descriptivo y correlacionales; el presente trabajo posee una etapa exploratoria para luego embeberse en un diseño descriptivo, pero presenta de manera leve el alcance correlacional.

El enfoque cualitativo se basa en un diseño de teoría fundamentada donde “su propósito es desarrollar teoría basada en datos empíricos que se aplicarán a áreas específicas” (Hernández et al., 2006, p.205).

También se puede ahondar más señalando dentro de la teoría fundamentada a un diseño emergente el cual se efectúa mediante codificación abierta y de esta manera se logra establecer las “categorías” a desarrollar y posterior se buscará relacionarlas para elaborar el bloque de teoría de manera unísona.

Por codificación abierta se entiende, sobre las bases establecidas por Hernández et al. (2006), que es aquel tipo de codificación donde se revisa toda la información para de esta manera generar distintas categorías o clases que mediante comparación constante se elaboran las “categorías iniciales”, posterior a ello se busca eliminar la redundancia de información y se agrupan en subcategorías, donde cada una de ellas aporta características a las nivel superior.

III.2 Variables: Definición conceptual y operacional

III.2.1 Objeto de estudio

- Infraestructura y arquitectura de las redes LTE existentes en la Corporación DIGITEL.

Variables:

- **Equipos:** son todos aquellos dispositivos pasivos o activos que conforman la red y participan en la transmisión y recepción de datos.
 - **Topología:** hace referencia a la forma de una red y muestra cómo los nodos están interconectados entre sí.
 - **Velocidades:** son todas aquellas velocidades de transmisión y de recepción bajo diferentes parámetros como de movimiento, de borde, estática, entre otros.
 - **Ancho de banda:** es la cantidad de información que se puede enviar a través de una conexión de red.
- Estudio del espectro de frecuencia.

Variables:

- **Frecuencia utilizada en LTE Corporación DIGITEL:** es la frecuencia estipulada para aplicar dicha tecnología de manera que se busca describir sus aportes y características.
- **Frecuencia utilizada en LTE en el mundo:** son las frecuencias utilizadas en diferentes países para aplicar dicha tecnología.
- **Frecuencia utilizada por los dispositivos móviles:** es la frecuencia con la cual trabajan los dispositivos de telefonía móvil en LTE.
- **Adaptación e integración de LTE en la Corporación DIGITEL:** este se deriva de las variables de los resultados obtenidos en el primer objeto de estudio.

III.3 Unidad de Análisis

Se trata de un estudio de caso basado en una investigación mixta la cual presenta ciertos planteamientos o preguntas de investigación que concluyen a dar respuesta a la viabilidad del proyecto, a continuación se presenta una tabla de características de planteamientos según el enfoque:

Planteamiento cuantitativos	Planteamiento cualitativos
Precisos y acotados o delimitados.	Abiertos.
Enfocados en variables lo las exactas y concretas que sea posible.	Expansivos, que paulatinamente se van enfocando en conceptos relevantes de acuerdo con la evolución del estudio.
Direccionados.	No direccionados en su inicio.
Fundamentados en la revisión de la literatura.	Fundamentados en la experiencia e intuición.
Se aplican a un gran número de casos.	Se aplican a un número menor de casos.
El entendimiento del fenómeno de guía a través de ciertas dimensiones consideradas como significativas por estudios previos	El entendimiento del fenómeno es en todas sus dimensiones, internas y externas, pasadas y presentes.
Se orientan a probar teorías, hipótesis y/o explicaciones, así como a evaluar los efectos de unas variables obre otras (los correlacionales y explicativos).	Se orientan a aprender de experiencias y puntos de vista de los individuos, valorar los procesos y generar teorías fundamentadas en las perspectivas de los participantes.

Tabla 2. Comparación entre planeamientos cuantitativos y cualitativos. Fuente:

Hernández, Fernández y Baptista, (2006, p. 525).

El presente proyecto de investigación trabaja con datos cuantitativos dados por aquellas mediciones no experimentales que se obtienen de pruebas efectuadas a las redes LTE presente en la Corporación DIGITEL y serán a su vez comparadas con

datos recolectados previamente de distintas referencias en un marco de tiempo de actualidad para establecer correlaciones entre las variables del objeto de estudio y emitir el resultado de los análisis.

Por otra parte los estudios cualitativos se basarán en análisis de los datos obtenidos al observar el comportamiento de la red LTE y su posible relación con los aspectos de la red actual, se tomará en cuenta de manera adicional la experiencia en el área de trabajo de los supervisores del proyecto como fuente de información.

La aparición de nuevas variables no está descartada, ya que se toma en consideración conceptos que vayan apareciendo a lo largo del estudio y que al tomarlos en cuenta darán orientación al análisis de los datos y robustez a los resultados.

III.4 Recolección de información

Para la recolección de información en base a pruebas, se utilizarán métodos de observación de la red, sin la manipulación de los valores obtenidos, para abstraer datos de las distintas capacidades de la misma y compararlos para encontrar relaciones entre ellos; estos datos serán plasmados en tablas y gráficas que faciliten su análisis.

Se tomará información de consultas a encargados del proyecto, técnicos de área y tutor, de modo que se logre una información completa en donde participen las experiencias obtenidas en el ámbito laboral, adicional a las referencias obtenidas por libros, páginas web, presentaciones y material universitario.

Las investigaciones documentales se llevarán a cabo mediante la lectura y constantes revisiones en diferentes fuentes seleccionando, en primera instancia, la información pertinente al objeto estudiado y posterior se realizarán labores de comparación y descarte para determinar la que posea el mayor valor agregado según nuestro criterio.

La información que deriva de la investigación para ser seleccionada debe poseer la cualidad de unanimidad, explicación clara y concisa del evento estudiado, profundidad y nivel acorde al trabajo de grado, así como una descripción previamente detallada de los conceptos que infieren en ella.

III.5 Pertinente al desarrollo

III.5.1 Investigación y consulta documental

- Descripción de la red interna LTE de la Corporación DIGITEL y desarrollo de las mismas.
 - Se llevará a cabo mediante investigaciones y consulta de material documental y técnico suministrado por la Corporación DIGITEL. Se detallarán los aspectos más importantes y característicos de una red LTE sin aludir a los aspectos confidenciales propios de la empresa. Se trabajará en conjunto con pruebas realizadas la red de LTE ubicadas alrededor de las instalaciones del “Centro Banaven”. Se realizará un informe con los datos obtenidos.
- Estudios de frecuencias que incluye: anchos de banda a utilizar basándose en normas CONATEL, frecuencias utilizadas en otros países y tendencias a la estandarización de las mismas en LTE.
 - Estudio investigativo que busca plasmar mediante tablas, resúmenes e imágenes las tendencias en Venezuela y el resto del mundo al uso de ciertas frecuencias para el desarrollo del LTE y mostrar la tendencia mundial al utilizar determinadas bandas. Se llevará a cabo un informe con las tablas e información obtenida.
- Estudios para integrar los equipos existentes al estándar LTE.

- Investigación y consulta del material suministrado por la empresa de la compatibilidad de LTE con los estándares y demás servicios ofrecidos por la Corporación DIGITEL. Mediante esta investigación se buscará elaborar un informe explicativo donde se establezcan los pasos a seguir para lograr la integración de los equipos existentes.
- Establecer un análisis de fortalezas y debilidades de las tecnologías de cuarta generación, complementarias y competidoras a LTE, para establecer beneficios y aportes a la empresa.
 - Investigación documental en la cual la información obtenida pasará por procesos de abstracción y análisis donde se coloquen en contraste las diferentes tecnologías pertenecientes a la cuarta generación y así establecer en un informe las fortalezas, debilidades y aplicaciones de cada una de ellas.

La información que se obtenga con respecto a cada tema se comparará con varias fuentes, de manera que se obtenga una información verídica y así evitar los bulos, fuentes erróneas.

Otro aspecto a considerar es la trascendencia de las nuevas tecnologías y los avances en el campo de las telecomunicaciones, por ello, periódicamente se revisarán las últimas tendencias y progresos para mantener actualizado los informes.

III.5.2 Pruebas a realizar

III.5.2.1 Caracterización de la red y compatibilidad

Para la caracterización de la red se recurrirá al *software FileZilla* el cual es un cliente/servidor FTP de código abierto que se puede implementar en varias plataformas, mediante el cual se simularán transferencias de archivos de distintos tamaños y se podrán observar las tasas de transferencia y la cola de transferencia. El *software FileZilla* se puede obtener desde la página web: www.filezilla-project.org.

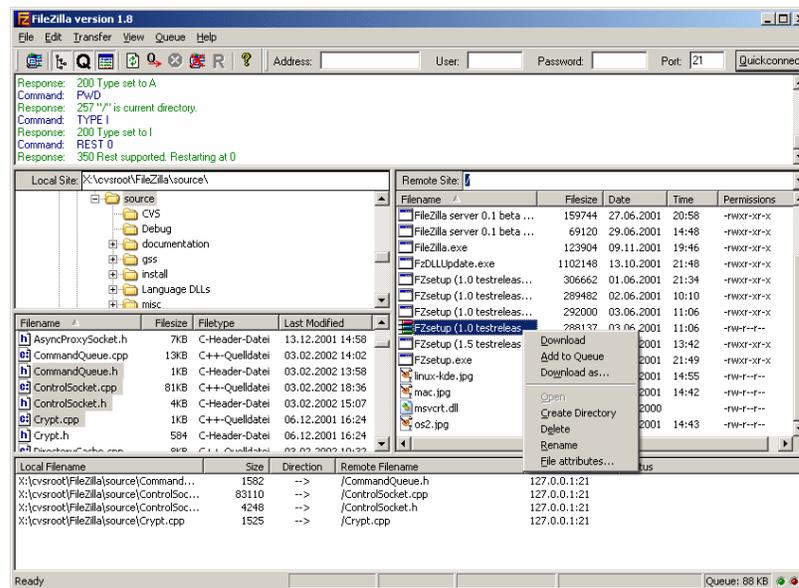


Figura 11. FileZilla Cliente. Fuente:

<http://gnuwin.epfl.ch/apps/FileZilla/es/index.html>

Se instalarán el *FileZilla* Servidor y Cliente en computadoras distintas y se procederá a enviar información y realizar pruebas.

Se utilizará de manera análoga el programa *Net Meter* instalado en cada una de las *laptops*. Este *software* monitorea el tráfico de una red a través de todas sus conexiones, en conjunto o en particular, en los equipos donde esté instalado y muestre a tiempo real la descarga y subida de información mediante escalas gráficas y de valores.

Net Meter posee funciones de seguimiento y registro diario, semanales, mensuales y resúmenes de tráfico. El programa permite configurar alarmas y notificaciones sobre elementos deseado del ancho de banda como límites preestablecidos.

El *software Net Meter* se puede obtener desde la página web: www.hootech.com/NetMeter/.

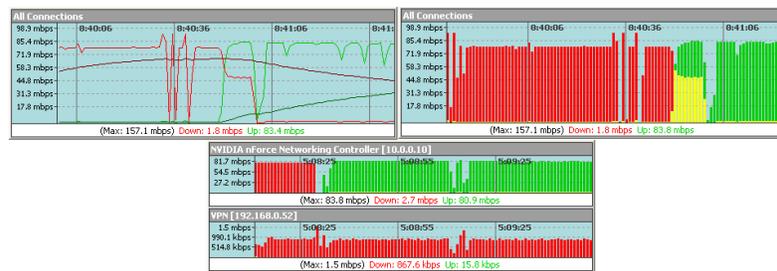


Figura 12. Interfaz *Net Meter*. Fuente: <http://www.hootech.com/NetMeter/>

Los datos mostrando por los anteriores programas se comprobaron utilizando el *software RxTx* comparando ciertos resultados obtenidos. Este mide el ancho de banda en transferencia entre el ordenador y múltiples servidores, mediante la descarga de archivos alojados en un servidor o páginas HTTP; muestra a tiempo real las velocidades promedio e instantáneas en la conexión, realiza resúmenes y emite un informe de la misma.

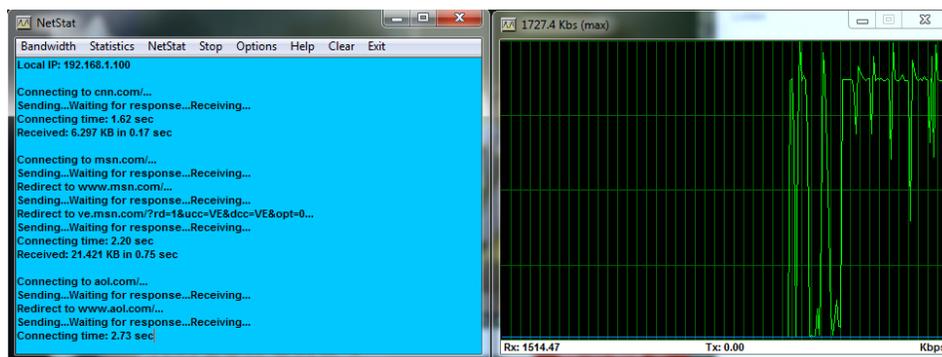


Figura 13. Programa *RxTx*. Fuente: Propia.

Se utilizará el programa *Iperf* el cual es un ambiente *Java* que corre sobre el programa conocido como *Iperf*.

Iperf es una herramienta de análisis cliente-servidor que se utiliza para medir anchos de banda, evaluar rendimientos de una red de comunicación, entre otros; simulando el tráfico UDP y TCP con características configurables como tiempo de transmisión, hilos a transmitir, ancho de banda, intervalos de reporte, tamaño del *buffer*, tamaños de segmentos, entre otros. Los *softwares Iperf* y *Jperf* se pueden obtener desde la página web: www.iperf.sourceforge.net.

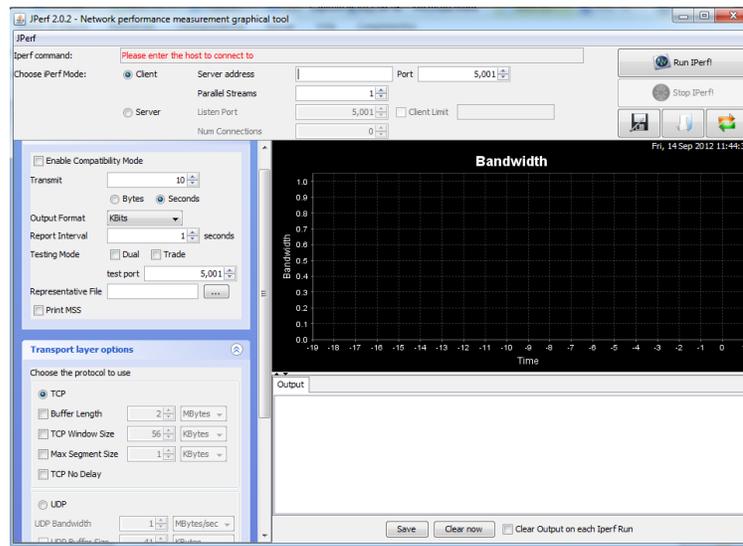


Figura 14. Programa *Jperf*. Fuente: Propia.

III.5.2.2 Planificación de pruebas

Se elaborarán las siguientes pruebas utilizando los *softwares* mencionados anteriormente. Estas serán explicadas a profundidad en el Capítulo IV del presente trabajo de grado:

- **Pruebas de funcionalidad**
 - **Pruebas de funcionalidades básicas**
 - ✓ Soporte de celdas.
 - ✓ Soporte a máxima velocidad de *uplink* y *downlink*.
 - **Handover**
 - ✓ Intra eNB *Handover*.
 - **Calidad de Servicio**
 - ✓ Complicación de servicio.
 - ✓ *Download* con el programa *torrent*.

- **Pruebas de rendimiento**
 - **Prueba de Latencia**
 - ✓ Latencia U-Plane.
 - ✓ Latencia de modo *Idle* a modo Activo.
 - **Prueba de medición de DL/UL *Throughput* con un UE**
 - ✓ Servicio *uplink* UDP.
 - ✓ Servicio de *downlink* UDP con la configuración 2x2 *Transmit Diversity*.
 - ✓ Servicio *downlink* UDP con configuración 2x2 MIMO adaptativo.
 - ✓ Servicio de *uplink* TCP.
 - ✓ Servicio de *downlink* TCP con la configuración 2x2 *Transmit Diversity*.
 - ✓ Servicio *downlink* TCP con configuración 2x2 MIMO adaptativo.
 - **Capacidad de la Celda**
 - ✓ *Uplink* UDP *throughput*.
 - ✓ *Downlink* UDP *throughput*.
 - ✓ *Uplink* TCP *throughput*.
 - ✓ *Downlink* TCP *throughput*.
 - **Pruebas de cobertura**
 - ✓ Visión general de las pruebas.

- **Pruebas experiencia del usuario**
 - **Pruebas de servicios básicos**
 - ✓ Video *streaming*.
 - **Prueba de servicios de Internet**
 - ✓ Video *streaming performance*.
 - ✓ Prueba de navegación a través de la Web.

III.6 Fase final y resultados

Está comprendido por todos los resultados de los análisis e interpretaciones pertenecientes al desarrollo. Se presentarán de forma concisa a modo de desenlace de los informes y productos finales del Capítulo IV, entre ellas están:

- Orientar a la empresa sobre la viabilidad de LTE.
- Cuadro de análisis de fortalezas y debilidades de las tecnologías de cuarta generación.
- Establecer beneficios y aporte de LTE a la empresa.
- Sugerir soluciones tipo soporte para la insuficiencia de servicios y equipos.
- Sugerir la topología más adecuada a la implementación.
- Caracterización tipo resumen del desarrollo de LTE en las redes de la Corporación DIGITEL.
- Cuadro de frecuencias utilizadas para LTE.

Esta fase final se basará en estudios de caso, análisis de los resultados de las pruebas realizadas e información obtenida durante la investigación para tener base teórica y práctica al momento de emitir el desenlace.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO

El siguiente capítulo contiene toda la información pertinente a la descripción general de la red interna LTE de la Corporación DIGITEL, las pruebas piloto realizadas, el espectro de frecuencia a utilizar, los pasos para la integración a la red LTE y las tecnologías competidoras 4G. Se describirá todo lo relacionado con las pruebas de funcionalidad y de rendimiento de la red, así como las pruebas de experiencia del usuario en la misma. Se detallará la obtención de los datos y se analizarán los resultados obtenidos en el proyecto.

IV.1 Descripción general de la red interna LTE de la Corporación DIGITEL

Los sistemas que conforman la red de comunicación de la Corporación DIGITEL se basan en la arquitectura *Release 4* y *Release 8* del 3GPP, en donde congenian las conmutaciones de circuitos y de paquetes. Las tecnologías que constituyen la estructura de la red son GSM/EDGE, UMTS y LTE, éstas poseen tres secciones independientes de la frecuencia en que trabajen, las cuales son:

- Usuarios.
- Red de radio de acceso.
- Red de conmutación o núcleo: que se subdivide en dominio de conmutación, dominio de datos, nodos comunes y sistema de paquetes evolucionado.

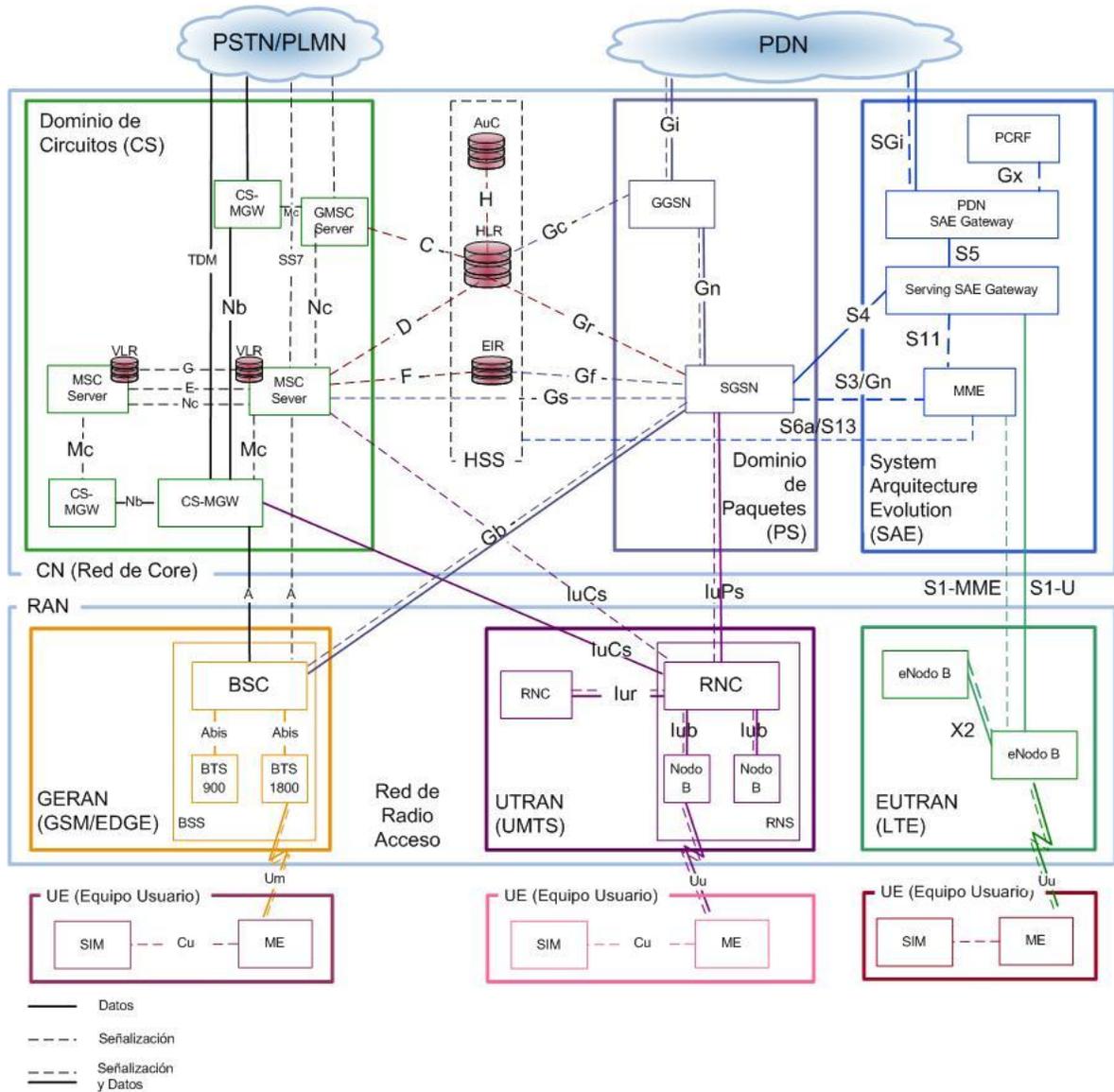


Figura 15. Esquema general de la red central. Fuente: DIGITEL.

En el sistema LTE, la red puede visualizarse mediante dos planos: plano de usuario y planos o bloques de operación.

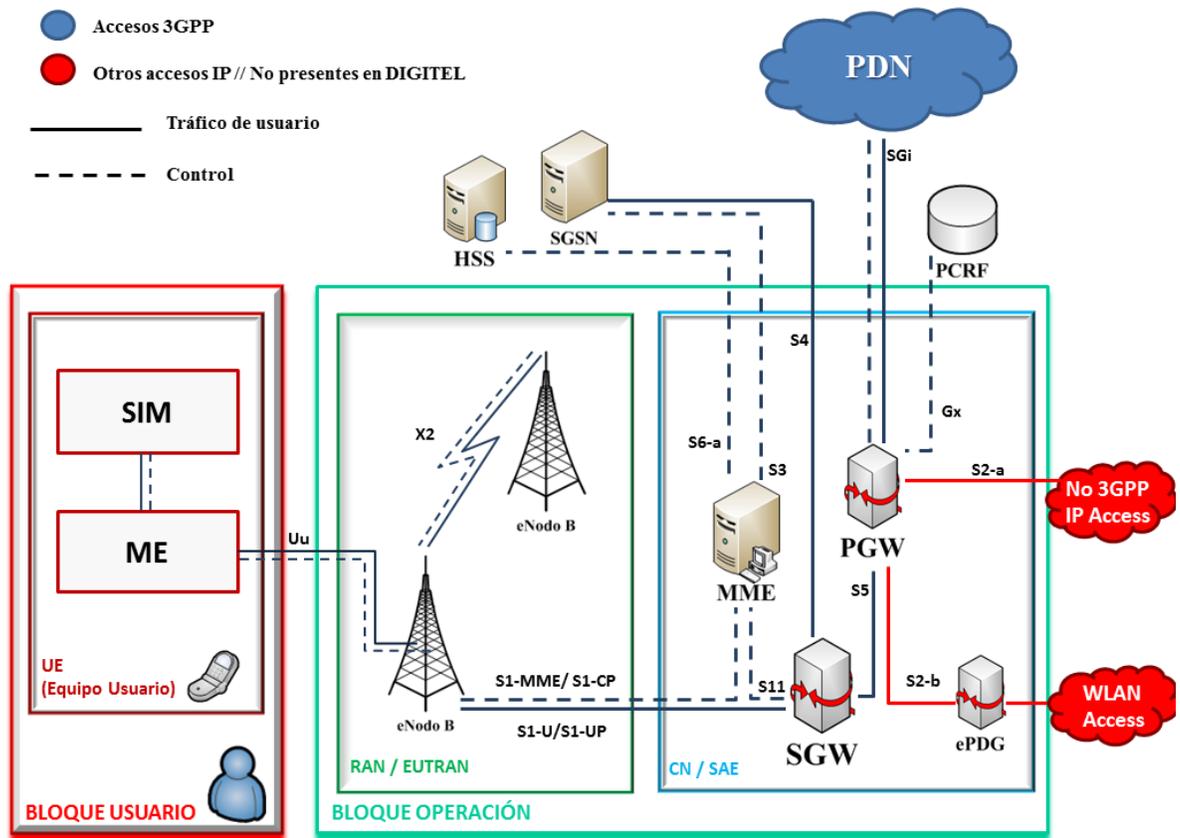


Figura 16. Arquitectura básica LTE. Fuente: Propia.

Según lo establecido en el *Release 8*, el plano de operación se puede dividir en dos bloques de operación: “Red de Radio Acceso” (RAN) llamada E-UTRAN en LTE y la “Red de Core” (CN) que en el caso de LTE se denomina “Red de Conmutación de Paquetes” (EPC) también conocida como SAE.

Aspectos a considerar:

- Como se muestra en la Figura 16, el 3GPP no incluye el HSS dentro de la red de conmutación. El conjunto de elementos de AuC, HLR y EIR pasan a denominarse HSS desde la perspectiva de una red LTE, el cual es compartido con los demás estándares de comunicación.
- Siguiendo la recomendación TR 23.882 se hace mención a las interfaces S2a y S2b en conjunto al ePDG (*Evolved Packet Data Gateway*) y AN-GW como

método de acceso de redes externas a la red LTE, pero no se consideran elementos fundamentales de la EPC.

Se presentan a continuación las relaciones entre interfaces y entidades, que se utilicen con regularidad, según el *Release 8* del 3GPP del 27 de Junio de 2012.

Interfaz <i>Release 8</i> Anterior	Interfaz <i>Release 8</i> 27-Jun-2012	Tráfico	Interacción
U _u	U _u	Control / Datos usuario	UM-eNB
X2	X2	Control/Datos usuario	eNB- eNB
S1-CP	S1-CP	Control	eNB-MME
S1-UP	S1-UP	Datos usuario	eNB-SGW
-	S2a	Control/ Datos usuario	No 3GPP Access-PGW
-	S2b	Control/ Datos usuario	ePDG – P-GW
S3	S3	Control	MME - SGSN
S4	S4	Datos usuario	S-GW - SGSN
S11	S5a	Control	MME – S-GW
S5	S5b	Datos usuario	S-GW – P-GW
S6a	S6	Control	MME - HSS
Gx	S7	Control	P-GW - PCRF
SGi	SGi	Control/ Datos usuario	P-GW - PDN

Tabla 3. Interfaces del sistema LTE según el *Release 8* del 3GPP. Fuente: Propia.

Entidad <i>Realease 8</i> Anterior	Entidad <i>Realease 8</i> 27-Jun-2012
P-GW	SAE Anchor
S-GW	3GPP Anchor

Tabla 4. Entidades del sistema LTE según el *Release 8* del 3GPP. Fuente: Propia.

IV.1.1 Interconexión de los eNBs y centros de conmutación

La interconexión de los eNBs y los centros de conmutación no es directa, y se puede apreciar desde dos puntos de vistas funcionales: a través de su constitución por capas y por sus capacidades de manejar el tráfico.

La constitución por capas está formada por una capa física dada por los medios de transmisión: microondas y fibra óptica, que soportan tecnologías como PDH, PSD, entre otras. La capa lógica se considera un medio de transmisión IP/MPLS.

Enfocándose en las capacidades de manejar el tráfico, se tiene que está dividida en el Acceso (también conocido como Última Milla o *backhaul*) y el *backbone*.

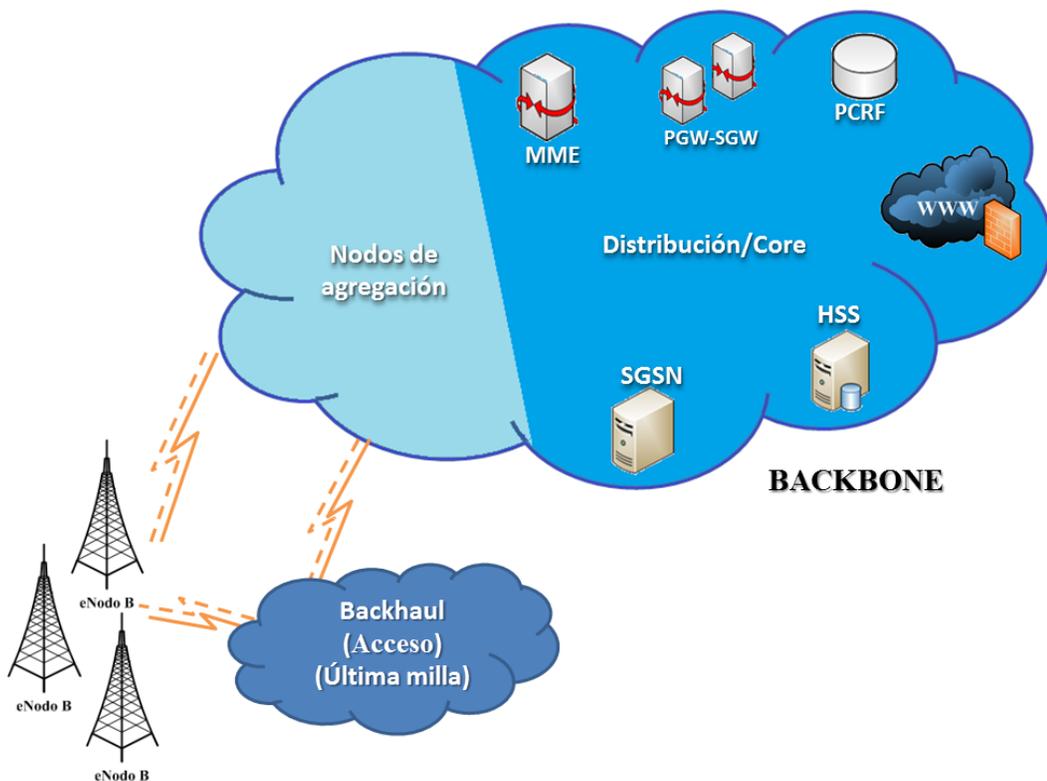


Figura 17. Interconexión de eNBs y centros de conmutación. Fuente: Propia.

- **El Acceso, Última Milla o *Backhaul*:** capaces de transportar desde 2 E1s a 75 E1s o 1 STM-1 y de soportar velocidades desde los 2 Mbps hasta los 400 Mbps, para el caso de los enlaces satelitales desde 128 kbps hasta 1024 kbps. En esta encontramos las interfaces de conexión entre eNB (X2) y entre eNB-EPC (S1).
- ***Backbone*:** está conformado por enlaces microondas, multiplexores de alta capacidad con tecnología PDH/SDH/EoSDH/DWDM, *switch* IP/MPLS, servidores de control y equipos encargados del transporte de paquetes en la red de acceso. Sus capacidades son desde un STM-1 hasta 10 Gbps pasando por conexiones físicas de E1/STM-1/STM-4/STM-16/STM-64 y FE/GbE. A su vez está dividido en dos zonas, según su planificación de tráfico:
 - Nodos de agregación: confluye las conexiones de los enlaces provenientes de la Última Milla y se caracteriza por la disponibilidad de alta capacidad.
 - Nodos de distribución/Core: manejan las conexiones de los nodos críticos de la red que manipulan grandes medidas de tráfico o información común a toda la red.

IV.1.2 Interconexión de nodos

La red de transporte entre nodos es a través de enlaces microondas y fibra óptica, medios propios de la Corporación DIGITEL. Los enlaces microondas emplean la redundancia M+N para brindar soporte en casos de fallas, en donde se pueden tener hasta 22 canales STM-1.

Las conexiones por fibra óptica son capaces de manejar rutas que soportan hasta 10 Gbps cada una, las cuales a su vez se agrupan para formar el enlace; las conexiones de *backbone* son mediante este tipo de transporte.

IV.1.3 Intervinientes en la señalización

Para mayor eficacia se emplean equipos denominados STP (puntos de referencia de señalización) que estarán conectados a todos los elementos del núcleo (*Core*) y distribuirán la señalización entre ellos.

IV.1.4 Interconexión con otras operadoras

La interconexión con los otros operadores mantendrá las siguientes características:

- Interconexión mediante el Protocolo SS7.
- Medios físicos de E1s y STM-1s según la demanda de tráfico.
- Enlace a disponer: microondas y fibra óptica
- Los medios de transmisión dependerán de la ingeniería de la zona, siendo de esta manera provistos por la Corporación DIGITEL o por las operadoras a conectarse.

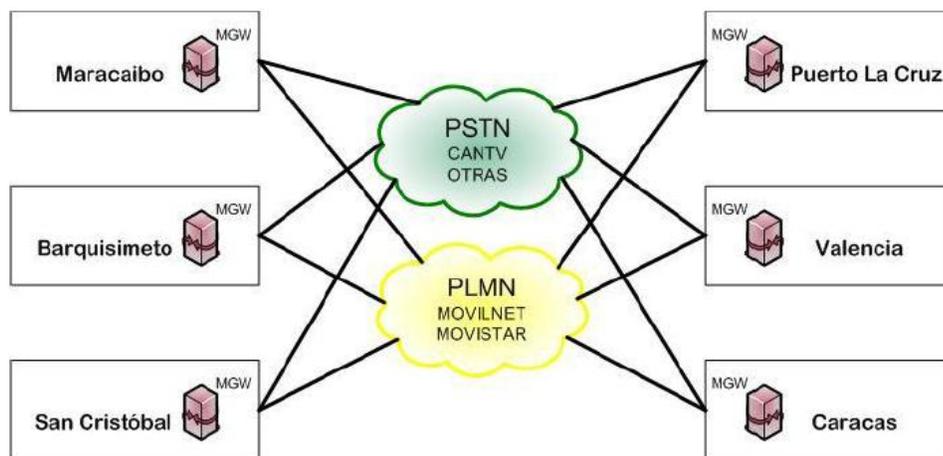


Figura 18. Esquema de interconexión para la red de frecuencia 1800.

Fuente: DIGITEL.

IV.1.5 Medición del desempeño del sistema

Según lo establecido por la Corporación DIGITEL, se tiene que la medición del desempeño está estrechamente relacionada con la capacidad que posee el sistema para el procesamiento de llamadas. Para ello se utilizaron indicadores de claves de desempeño (KPI) mediante la medición de distintas variables, entre ellas están:

- Potencia total de transmisión de las estaciones base.
- Tráfico de encabezados generados por el relevo.
- Tasa de llamadas caídas.
- Retardo en los paquetes de datos.
- Tasa de llamadas bloqueadas en hora pico.
- Tasa de llamadas completadas, entrantes y salientes.

Estas variables estarán a constante monitoreo, mediante resultados estadísticos ofrecidos por los centros de conmutación; éstas serán organizadas y almacenadas en bases de datos llamadas *data warehouse*.

Toda esta información será sometida a procesamiento y análisis por las áreas de optimización e ingeniería para así realizar mejoras y ajustes en las distintas áreas (almacenamiento de los equipos, capacidades de procesamiento, orientación de antenas, ajuste de potencia).

IV.1.6 Capacidades del sistema

Se establecen los siguientes criterios según la 3GPP en el *Release 8*:

- La celda debe soportar un mínimo de 200 usuarios en modo activo, en espectros asignados de hasta 5 MHz.
- E-UTRAN debe estar optimizada para bajas velocidades de translación del dispositivo (0 a 15 km/h). De igual manera debe atender a las velocidades entre 15 y 120 km/h con alto rendimiento.

- La movilidad debe mantenerse para celdas de 5 km, permitiéndose una ligera degradación para celdas de 30 km, sin excluir a las de 100 km.

IV.1.6.1 Capacidad a instalar

Se muestra a partir de información suministrada por la Corporación DIGITEL que las capacidades de voz a instalar en conjunto a la nueva tecnología son:

Parámetro	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Capacidad de tráfico total de la red (Erlangs)	30.000	39.000	45.500	47.500	50.000

Tabla 5. Capacidad de tráfico de la red. Fuente: DIGITEL

IV.1.6.2 Escalabilidad y modularidad del sistema

Se admite la capacidad de procesar las banda base de GSM900, GSM1800, HSDPA900 y LTE1800 mediante las BTS ya instaladas, logrando diferenciar entre cada servicio mediante la activación de licencias correspondientes y asignando a la cabecera de radio la frecuencia asignada a la tecnología.

IV.1.6.3 Estimación de la demanda de usuarios

Correspondiente al espectro asignado para LTE se obtiene la siguiente información suministrada por la Corporación DIGITEL, en base a penetración de mercado, influencias de las demás operadoras, servicios disponibles, experiencias, entre otros.

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Usuarios LTE	26.000	100.000	198.000	216.000	240.000

Tabla 6. Estimación demanda de usuarios. Fuente: DIGITEL.

IV.1.7 Generalidades de la calidad de servicio

Para darle cualidad al aspecto de disponibilidad del sistema, se recurrirá a los siguientes parámetros:

- **MTTF (*Mean Time To Failure*):** es el tiempo estimado para que un sistema falle por primera vez, dado por el fabricante o diseñador.
- **MTTR (*Mean Time To Repair*):** es el tiempo que se tarda en arreglar un sistema. Depende de factores como distancia, personal, capacidad y herramientas.

El sistema se divide en sub-sistemas (*backhaul* y *backbone*) y equipos, para un mayor control del mismo y capacidades de reparación en casos de fallos. Los factores que influyen en esta categorización o división se basan en la influencia que representa cada uno de ellos como variable que depende de la distancia a la que estén separadas de las estaciones del centro de conmutación.

Para esto se realizan cálculos para obtener la disponibilidad para una sesión de datos, en donde se hace uso de los parámetros antes mencionados (MTTR y MTTF) y se busca conseguir los valores de MTTR (r) del sistema y *lambda* (λ).

Llamada de Datos LTE

Id	Tipo de Equipos de Red	MTTF en años	Por Equipo de Red		Por Sub-Sistema de Red		
			$\lambda = 1/MTTF$	MTTR (r) en hrs	# de saltos	MTTR (r) en hrs	$\lambda = 1/MTTF$
1	eNodo B	30.00	0.03333	4.00	1	4.00	0.03333
2	Ultima Milla	7.00	0.14286	4.00	1	4.00	0.14286
3	Backhaul	30.00	0.03333	2.00	5		
4	Backhaul	30.00	0.03333	2.00	5	1.00	0.00444
5	IP/MPLS	30.00	0.03333	1.00	5		
6	IP/MPLS	30.00	0.03333	1.00	5	0.50	0.00222
7	SDH	30.00	0.03333	2.00	5		
8	SDH	30.00	0.03333	2.00	5	1.00	0.00444
9	MME/S-GW	45.66	0.02190	1.00	1	1.00	0.02190
10	PDN	NA	NA	NA	NA	NA	NA
						<u>3.52130</u>	<u>0.20920</u>

Indisponibilidad del Sistema Llamada de Datos 0.42418 hrs/año

Tabla 7. Llamada de datos LTE. Fuente: DIGITEL.

$$\lambda_{DATOS} = \frac{\sum_n (r_n \times \lambda_n)}{\sum_m \lambda_m}$$

$$r_{DATOS} = \sum_n r_n$$

$$U_{DATOS} = \frac{\lambda_{DATOS} r_{DATOS}}{\lambda_{DATOS} r_{DATOS} + 1} = 0,42418hrs / año$$

Para la llamada de datos se establece el siguiente diagrama de conexión:

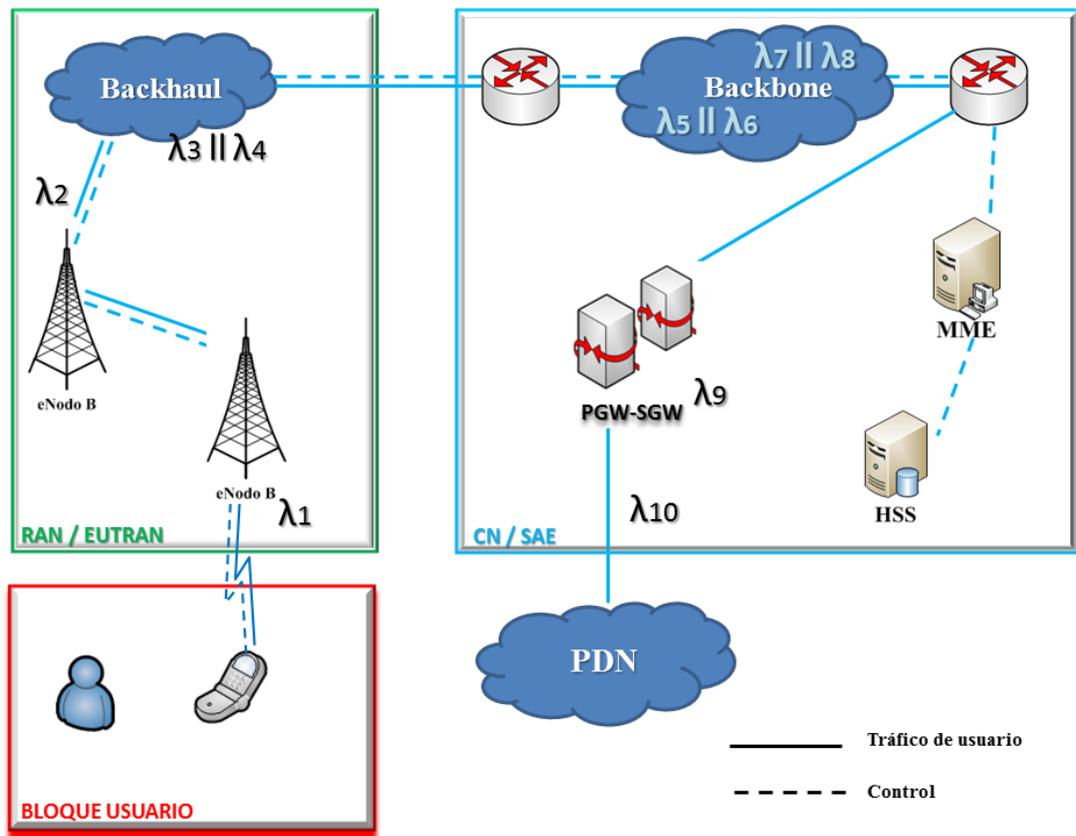


Figura 19. Diagrama de conexión para llamada de datos. Fuente: Propia.

IV.1.8 Uso del espectro

El bloque de frecuencia $F-F''$ corresponde al asignado a LTE, teniendo apareada las bandas de 1810-1825 MHz para el *downlink* y 1715-1730 MHz para el *uplink*.

Cada enlace abarca 15 MHz de los cuales 5 MHz agrupan 25 canales para GSM y los 10 MHz restantes están destinados a una portadora LTE que incluye dos bandas de guarda de 500 kHz cada una.

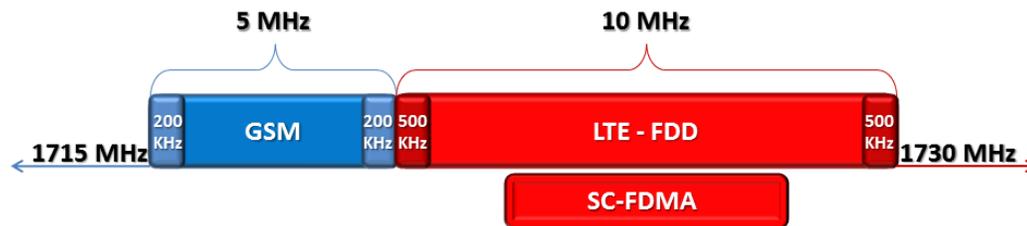


Figura 20. Enlace ascendente. Fuente: Propia.

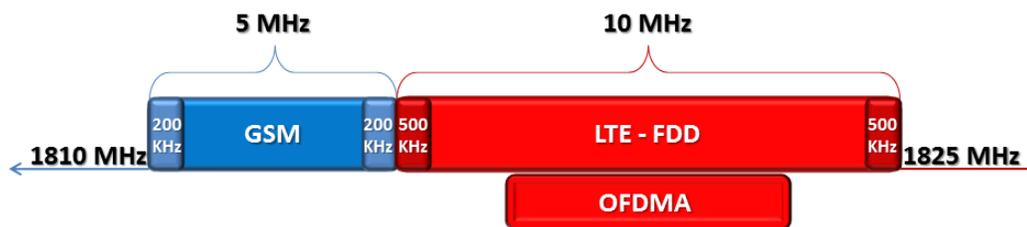


Figura 21. Enlace descendente. Fuente: Propia

De manera adicional se presta ciertos requerimientos de la tecnología LTE y capacidades por la portadora en el *downlink* y el *uplink*. A continuación se muestra las especificaciones al respecto suministradas por la Corporación DIGITEL.

Tecnología de acceso al medio	Portadora	Número de llamadas simultaneas	Reúso	Máxima velocidad Data CS/PS
LTE	10 MHz	0	1/1	PS: 45 Mbps por portadora en DL y 22

Tabla 8. Requerimientos y capacidades LTE. Fuente: DIGITEL.

IV.1.9 Celdas o radio bases

En el caso de LTE se utilizan los equipos e interfaces correspondientes que se aprecian en la Figura 22.

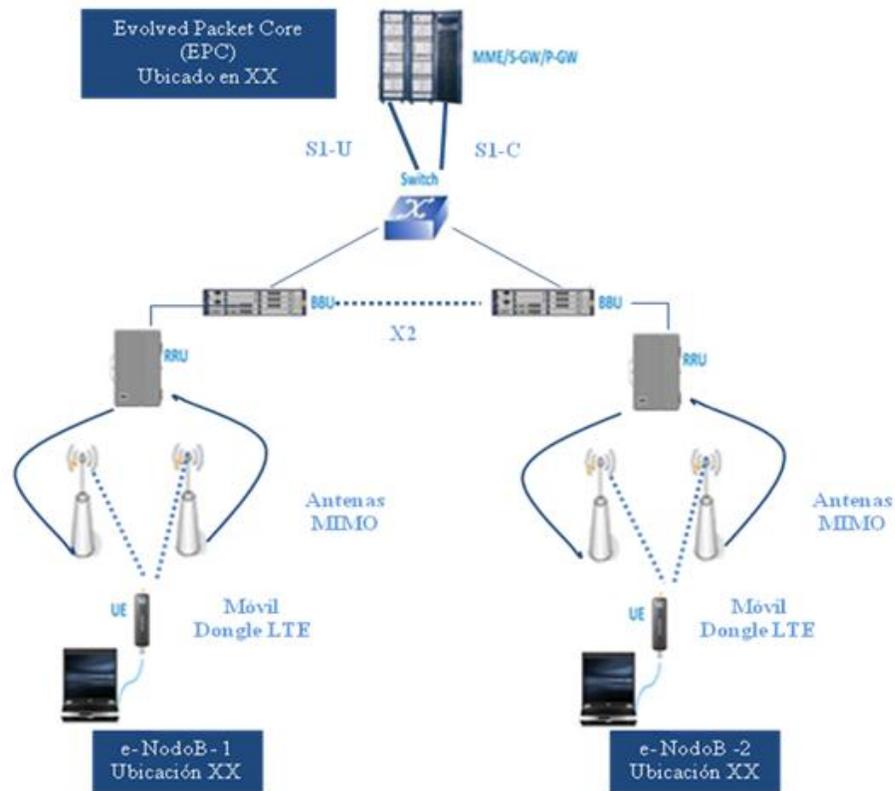


Figura 22. Equipos e interfaces de la celda LTE. Fuente: DIGITEL.

Esta estructura se puede emplear en conjunto con los demás sistemas al cargar en las BBU (*Baseband Unit*) las funcionalidades y licencias respectivas de cada uno, además se utiliza sistemas RRU (*Remote Radio Unit*) y antenas para cada una de las tecnologías.

También se puede incurrir a combinar las salidas y por consecuencia se reduce el espacio requerido. Lo señalado variará según el caso que se presente en la ingeniería de sitio.

Tecnología	Capacidad de transmisión de la estación (promedio / máximo)	Canales por Sector (promedio / máximo)
LTE	75 Mbps / 150 Mbps	1 portadora de 10 MHz

Tabla 9. Capacidad de transmisión de datos de las estaciones. Fuente: DIGITEL.

IV.1.10 Características de la red de acceso inalámbrica

IV.1.10.1 Técnicas de acceso a utilizar

Para la interfaz de aire correspondiente a LTE se utilizará OFDMA para el *dowlink* que brinda una gran cantidad de sub-portadoras ortogonales que por el medio de acceso soportan modulaciones QPSK, 16QAM y 64QAM. Para el *uplink* se utiliza SC-FDMA una variante del OFDMA, admitiendo QPSK, 16QAM, siendo opcional 64QAM.

Tecnología	Modulación	Tasa de transmisión pico teórica	Tasa de transmisión promedio (DL)	Tasa de transmisión promedio (UL)	Ancho de banda por portadora	Eficiencia espectral (bps/Hz)
GSM/EDGE	8 PSK	380 kbps	100-120 kbps	40-50 kbps	200 kHz	0.17 - 0.33
LTE	QPSK 16 QAM 64 QAM	147 Mbps	42-50 Mbps	21-25 Mbps	10 MHz	4.2 -16.32

Tabla 10. Técnicas a utilizar. Fuente: DIGITEL.

IV.1.10.2 Protocolos a utilizar

A continuación se presenta una tabla en donde se reúnen los protocolos más relevantes en conjunto a su interfaz, plano y entidad que se planea utilizar.

Protocolos	Interfaz	Plano	Entidad
PDCP	U _u	Usuario/Control	UE/eNB
RLC	U _u	Usuario/Control	UE/eNB
MAC	U _u	Usuario/Control	UE/eNB
RRC	U _u	Control	UE/eNB
NAS	(encapsulado dentro del RRC)	Control	UE/MME
GTP-U	S1/X2	Usuario	eNB/MME
SCTP	S1/X2	Control	eNB/MME
S1-AP	S1	Control	eNB/MME
X2-AP	X2	Control	eNB

Tabla 11. Protocolos a utilizar en el sistema UE-EPC. Fuente: Propia.

IV.1.11 Servicios en LTE ofrecidos por la Corporación DIGITEL

IV.1.11.1 Servicios conmutados por paquetes de Persona a Persona

- Mensajería corta (SMS): servicio de envío y recepción de mensajes de texto.
- Mensajería de voz: servicio de buzón de recuperación de mensajes de voz.
- Mensajes multimedia (MMS): servicio de mensajes multimedia (fotos, videos, texto, voz, entre otros).
- Mensajes instantáneos: mensajes de voz instantáneos.
- Correo electrónico móvil: servicio de correo electrónico en el teléfono móvil.

IV.1.11.2 Servicios de contenidos

- Acceso a Internet: datos por paquetes para navegación.
- Audio y video para multitudes (audio/video *streaming*): ofrecer el servicio de transmisión de videos a todas las personas que soliciten la conexión al mismo tiempo.
- Descarga de contenidos: se refiere a la descarga de tonos de llamada seleccionables por el usuario (*Ringback Tone*), aplicaciones, video clips, música, entre otros.

IV.1.11.3 Otros Servicios

- Localización geográfica (LBS): servicio de geo-ubicación del móvil.
- Redes Privadas: servicio de interconexión de redes para comunicar las distintas localidades de clientes corporativos, ofreciendo calidad de servicio, seguridad, ancho de banda para los datos y conexión de voz.
- Diferenciación de servicios: se refiere a ofrecer paquetes con calidad de servicio (QoS) garantizada; es decir, que el usuario paga según la prioridad que se le dé al servicio que desea recibir.

IV.2 Caracterización de la tecnología LTE en las redes de la Corporación DIGITEL

Las pruebas realizadas constan de dos enfoques:

- Pruebas realizadas por los tesisistas: las cuales fueron diseñadas o efectuadas por los mismos y posterior se procedió a realizar un análisis y expresar los resultados.
- Resultados dados por la Corporación DIGITEL: la empresa, después de realizar unas pruebas piloto, facilitó los resultados a los tesisistas tal que en primer lugar los mismos pudieran reproducir ciertas pruebas para poder comparar los resultados y realizar su respectivo análisis. Por otro lado, otros resultados fueron tomados directamente para que se realizara un proceso de abstracción y análisis.

IV.2.1 Configuración general de las pruebas

Previo a la realización de las pruebas pilotos, se definieron los parámetros para la configuración general de las mismas.

Parámetros	
Entorno de Prueba	Campo
Frecuencia	1800 MHz
Ancho de Banda	20 MHz
Modo Duplex	FDD
CP	Normal CP
Modo de Transmisión	<i>Downlink: 2x2MIMO</i> <i>Uplink: SIMO</i>
Tipo de modulación	<i>Downlink: 64QAM/16QAM/QPSK</i> <i>Uplink: 16QAM/QPSK</i>
Espaciado de la sub-portadora	15 kHz

Tabla 12. Configuración General de las pruebas. Fuente: DIGITEL.

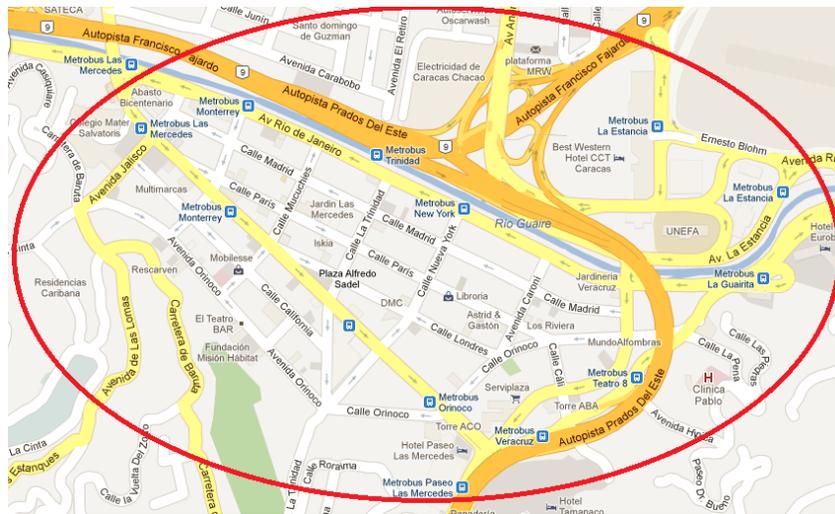


Figura 24. Puntos móviles de prueba. Fuente: Propia.

IV.2.1.3 Herramientas de prueba

Las herramientas utilizadas se presentan en la Tabla 14.

Herramienta	Versión
ZTE MF820	MDM9200B-2.4.331120T
Laptop	Dell Inspiron 1420
Laptop	Dell Inspiron 460m
Laptop	Acer Aspire One
Net Meter	v 3.6 build 437
FileZilla	v 3.5.3
RxRt	v 3.2

Tabla 14. Herramientas de prueba. Fuente: Propia.

IV.2.1.4 Consideraciones a tomar

- **FileZilla**

Se utiliza la versión “*FileZilla Cliente*” en las laptops a utilizar y se encuentra instalado “*FileZilla Servidor*” en el servidor correspondiente.

- **Características laptop:**

Las especificaciones técnicas de las laptops utilizadas son:

- Sistema operativo: Windows XP.
- Memoria RAM: 1 GB.
- Procesador: Intel Core Duo 1,8 GHz.

- **Software LTE**

Para los resultados dados por la Corporación DIGITEL se utilizó un *software* de análisis y monitoreo de redes, el cual por reglamentos de confidencialidad no se puede hacer referencia al nombre.

Para analizar los resultados de las pruebas efectuadas durante la tesis se utilizó capturas del *software Net Meter* y de las herramientas que éste ofrece.

IV.2.2 Pruebas generales

IV.2.2.1 Pruebas de funcionalidad

Estas pruebas determinan si el sistema soporta determinados anchos de banda y satisfacen los requisitos funcionales esperados.

IV.2.2.1.1 Prueba de funcionalidades básicas

IV.2.2.1.1.1 Soporte de celdas a velocidades predeterminadas

La finalidad de esta prueba fue comprobar que el sistema soporta ciertos anchos de banda. La Corporación DIGITEL preestableció dos anchos de banda a 10 Mbps y 20 Mbps.

Los resultados de esta prueba fueron suministrados por la empresa; en donde utilizando MS-DOS, el comando PING y el software privado se llegó a los siguientes resultados:

Uplink Bandwidth	10.0
Downlink Bandwidth	10.0

Figura 25. Resultados Soporte Velocidades a 10 Mbps. Fuente: DIGITEL.

Uplink Bandwidth	20.0
Downlink Bandwidth	20.0

Figura 26. Resultados Soporte Velocidades a 20 Mbps. Fuente: DIGITEL.

Se realizó la siguiente prueba: se ubicó el UE en un punto de buena cobertura. Se estableció una conexión directa con el servidor mediante el programa *FileZilla*. Se procedió a enviar una gran cantidad de paquetes mediante el protocolo FTP, desde el cliente al servidor (*uplink*) y desde el servidor al cliente (*downlink*). Mediante el programa *Net Meter* se procedió a observar la velocidad de transferencia.

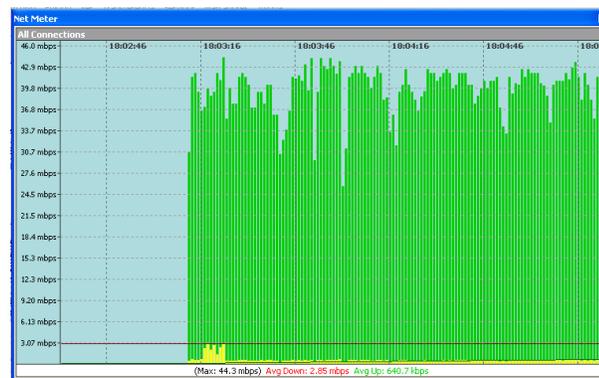


Figura 27. Soporte de celdas velocidad 100 Mbps *uplink*. Fuente: Propia

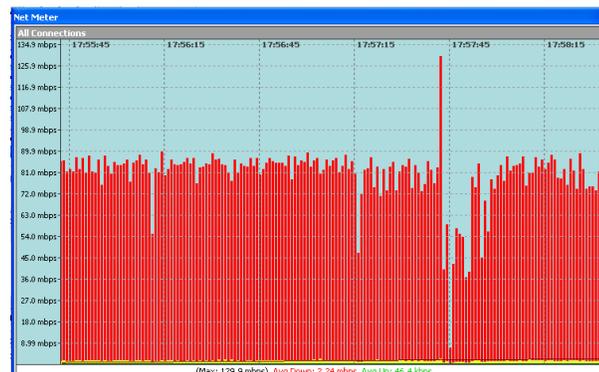


Figura 28. Soporte de celdas velocidad 100 Mbps *downlink*. Fuente: Propia

Se puede observar en la Figura 28 que las velocidades alcanzadas en el sistema oscilan entre 81 y 90 Mbps de *downlink*. No se alcanza una velocidad constante de 100 Mbps debido que existe una pérdida de velocidad la cual es atribuida a la eficiencia de los equipos que participan en la prueba, en este caso las especificaciones técnicas de la laptop y el modem LTE.

En la Figura 27 se observa que la velocidad *uplink* fluctúa entre los 40 Mbps y 43 Mbps. Se encontró el mismo fenómeno en donde no se ofrece la máxima velocidad debido a las razones descritas anteriormente.

Vale la pena mencionar que el modem es de categoría 3, de modo que las velocidades máximas para *downlink* son de 100 Mbps y para *uplink* es de 50 Mbps.

IV.2.2.1.2 Pruebas de *handover*

Esta prueba se llevó a cabo para comprobar la función del *handover*.

IV.2.2.1.2.1 Intra eNB *handover*

Se configuraron dos celdas (celda “A” y celda “B”) en un mismo eNB como celdas vecinas para la ejecución de la prueba.

Inicialmente se ubicó el UE en un punto de la celda “A” con señal óptima, luego se ejecutó el MS-DOS y con el comando PING se conectó al servidor. Haciendo uso del programa *FileZilla* y mediante el protocolo FTP se cargaron paquetes de gran tamaño del servidor al cliente (*downlink*).

Posteriormente se procedió a movilizar el UE desde la celda “A” hacia la celda “B” y viceversa, siguiendo una ruta predeterminada durante 4 minutos aproximadamente.

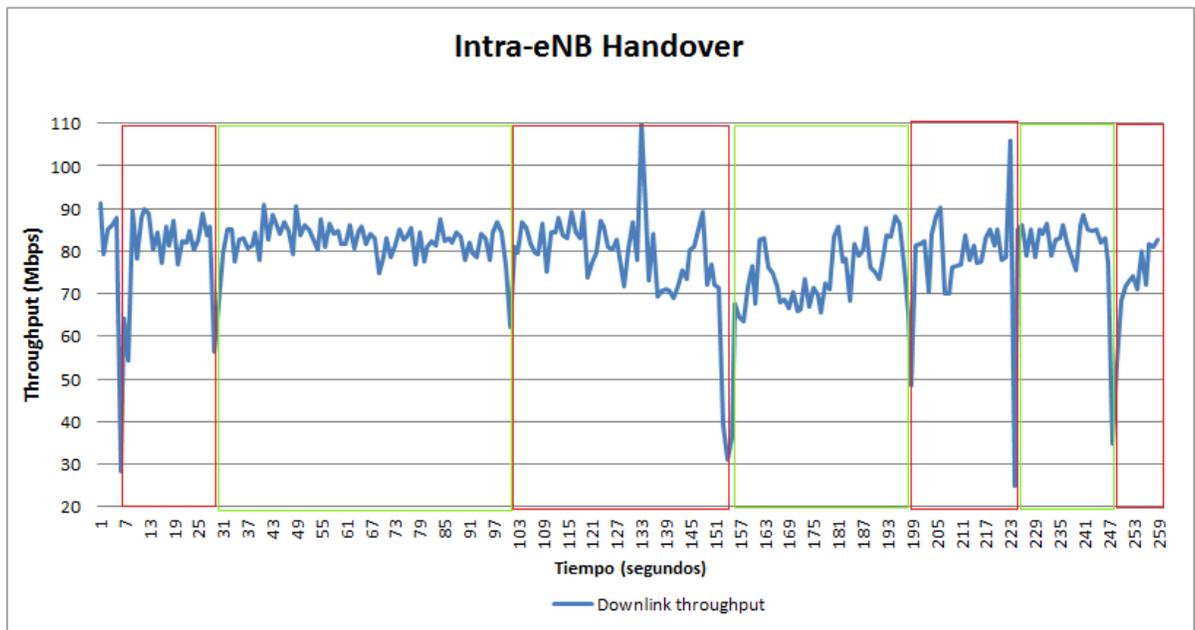


Figura 29. Diagrama del *downlink throughput* durante el *handover*. Fuente: Propia.

En la Figura 29 se observa un diagrama correspondiente al *downlink throughput* en donde cada cuadrado representa que ocurrió el *handover*.

Se verificó que el *handover* sucede cada vez que el valor del *throughput* disminuye abruptamente en un momento determinado, y aumenta cuando se conecta con la nueva celda. Esto se debe a la desconexión momentánea que ocurre cuando se cambia de una celda a otra mientras se recorre la ruta predeterminada.

IV.2.2.1.3 Pruebas de calidad de servicio

IV.2.2.1.3.1 Prueba de complicación de servicio

La empresa otorgó resultados de pruebas referentes, cuyo propósito es soportar varias operaciones al mismo tiempo complicando el servicio. Se configuraron las portadoras GBR (*Guarantee Bit Rate*), luego se enviaron paquetes UDP desde el servidor y simultáneamente se generó un video *streaming*. Se incrementó el *path loss* hasta que quedó limitado el recurso.

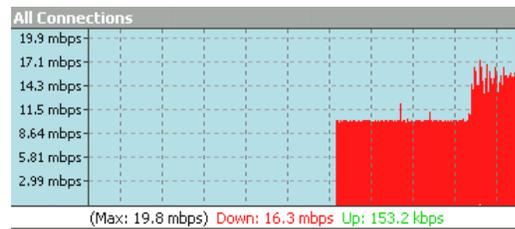


Figura 30. *Downlink throughput* UDP. Fuente: DIGITEL.

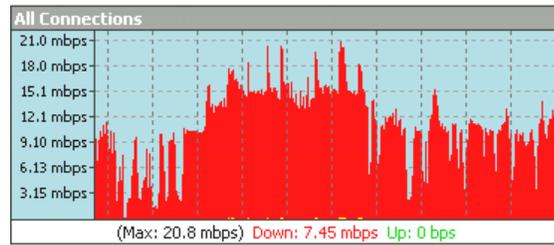


Figura 31. *Downlink throughput* UDP cuando quedaron limitados los recursos.

Fuente: DIGITEL.

La Figura 30 representa el comienzo de la prueba. Se observó que el *downlink throughput* fue de 10 Mbps, pero cuando empezó el video *streaming*, el *throughput* aumentó a 20 Mbps. Por lo tanto se requiere de 5 Mbps a 10 Mbps para sustentar el servicio de video *streaming*.

Posteriormente se movió el UE a un área remota para simular una situación en donde se aumenta el *path loss* hasta el punto donde la señal del UE es atenuada y éste no soporte el desenvolvimiento de ambos servicios simultáneamente. Dada esta situación se apela a la propiedad de prioridades asignadas a cada servicio, donde la mayor prioridad la poseía el servicio UDP, de manera que éste funcionó de manera óptima e ininterrumpida mientras el servicio de video *streaming* presentaba retrasos en la reproducción y fallas.

IV.2.2.1.3.2 Prueba de *downlink* con *torrent*

Primero se ubicó el UE en un punto con señal óptima, se conectó con el servidor con el comando PING. Mediante el uso del programa *uTorrent*, se procedió a realizar la descarga de archivos de gran tamaño desde servidores *torrent*.

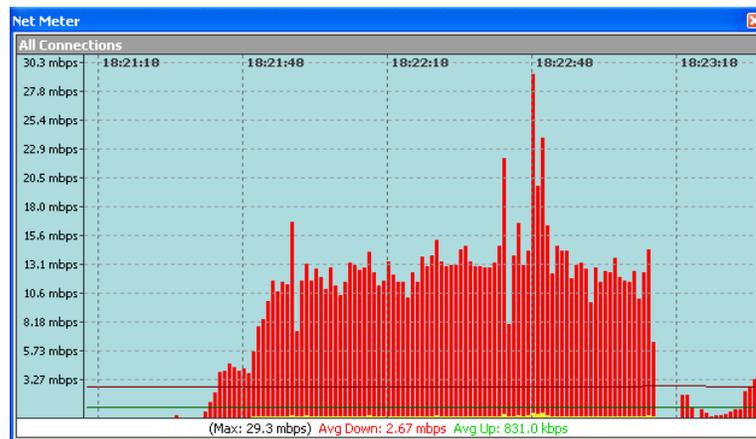


Figura 32. Velocidades *downlink* para archivo *torrent*. Fuente: Propia.

Se puede observar que el valor pico obtenido en el *downlink* fue de 29,3 Mbps y el valor promedio fue de 13 Mbps. La descarga desde el servidor *torrent* fue rápida y exitosa.

IV.2.2.2 Pruebas de rendimiento

Son aquellas pruebas realizadas bajo ciertas condiciones o perspectivas para determinar la velocidad con que se lleva a cabo ciertas tareas, en este caso la transferencia de determinados paquetes de información bajo ciertos protocolos de transporte.

IV.2.2.2.1 Pruebas de latencia

IV.2.2.2.1.1 Latencia Plano de Usuario

La Corporación DIGITEL otorgó pruebas referentes, realizadas mediante el comando “PING” y tomando los valores mínimos, máximos y promedios de latencia, en conjunto al porcentaje de paquetes perdidos.

Esta prueba se realizó con tres tamaños distintos de paquetes y se repitió tres veces cada una.

Los resultados se muestran a continuación:

	Veces	Min (ms)	Max (ms)	Promedio (ms)	Pérdidas
32 bytes	1	11	37	13	0
	2	11	22	13	0
	3	11	33	13	0
1000 bytes	1	12	37	15	1%
	2	13	37	15	1%
	3	12	37	14	0
1500 bytes	1	13	38	14	0
	2	13	22	14	0
	3	12	39	15	1%

Tabla 15. Resultado latencia plano usuario en milisegundos. Fuente: DIGITEL.

Basándose en la estandarización del 3GPP, el cual establece que el retardo de la red de radio acceso en el plano de usuario debe ser menor a 10 ms.

Se puede observar que la latencia obtenida en todas las pruebas está por encima del valor fijado. Incluso tomando en cuenta el valor mínimo en las pruebas, éste sobrepasa el estándar.

IV.2.2.2.1.2 Latencia de modo *idle* a modo activo

La Corporación DIGITEL, mediante el uso del *software* LTE de análisis propio de la compañía y del comando PING se procedió a anotar los valores de MSG1 y RRC.

La latencia se calcula restando ambos valores y para ello se repitió el procedimiento 10 veces.

A continuación se muestra una tabla con los datos obtenidos:

Times	MSG1 (ms)	RRC <i>Connection Reconfiguration Complete</i> (ms)	Diferencial (ms)
1	313	381	68
2	570	649	79
3	273	345	72
4	615	684	69
5	261	332	71
6	755	821	66
7	684	756	72
8	396	463	67
9	321	391	70
10	376	446	70
Promedio (ms)	70.4		

Tabla 16. Resultados de las pruebas de latencia de *Idle* a activo. Fuente: DIGITEL.

El valor establecido por el 3GPP para la latencia máxima al pasar del modo *idle* al modo activo es de 100 ms. El valor promedio obtenido por las pruebas está por debajo del valor máximo, teniendo en cuenta que ningún dato presentado sobrepasa.

IV.2.2.2.2 Prueba de medición de DL/UL *throughput* con un UE

IV.2.2.2.2.1 Servicio *uplink* UDP

Para la actual prueba se ubicó el UE en un punto óptimo dentro de la celda que presta el servicio. Se cercioró mediante el MS-DOS y el comando PING la conectividad con el servidor y se procedió a enviar paquetes UDP desde el cliente al servidor, por medio de la herramienta IPERF. Se envió un hilo de ejecución para tráfico UDP a un ancho de banda de 100 Mbps durante 2 minutos.

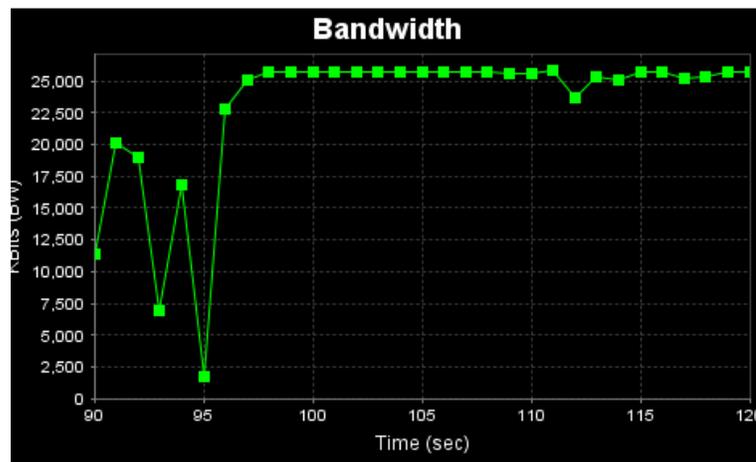


Figura 33. Hilos de ejecución transmitidos en *uplink* UDP. Fuente: Propia.

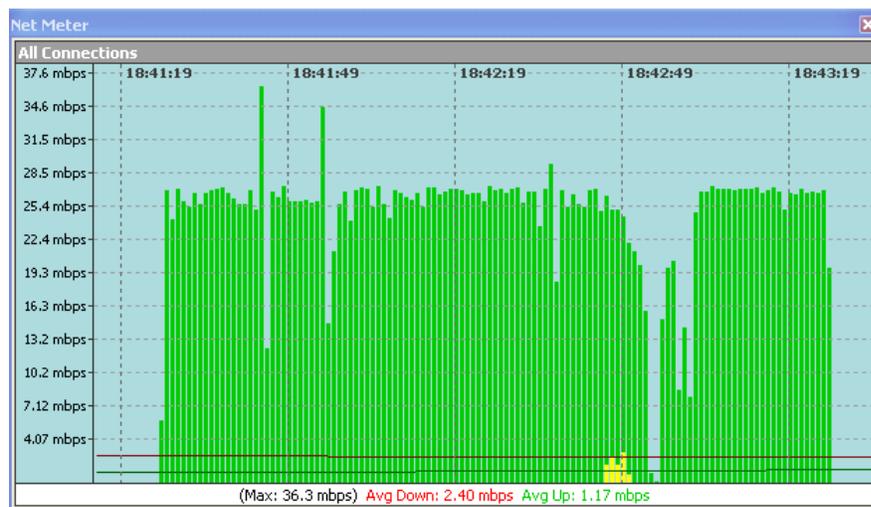


Figura 34. Velocidad de *uplink* UDP. Fuente: Propia.

Se puede observar que el valor pico obtenido fue de 27,7 Mbps y el valor promedio fue de 26,5 Mbps. En un principio se trabajó con un ancho de banda de 100 Mbps, pero el modem no alcanzará velocidades superiores a 50 Mbps porque es un dispositivo de categoría 3. Lo mencionado anteriormente tampoco se cumple pues las velocidades alcanzadas son aproximadamente la mitad del valor teórico a conseguir, esto se debe a que se aplicó una configuración en el servidor en donde el ancho de banda destinado al *uplink* UDP está limitado a 25 Mbps, asociado a la prioridad asignada al servicio.

IV.2.2.2.2 Servicio *downlink* UDP

En esta prueba se suministraron los siguientes resultados por parte de la empresa. Para el servicio *downlink* UDP con la configuración *2x2 Transmit Diversity* se obtuvo:

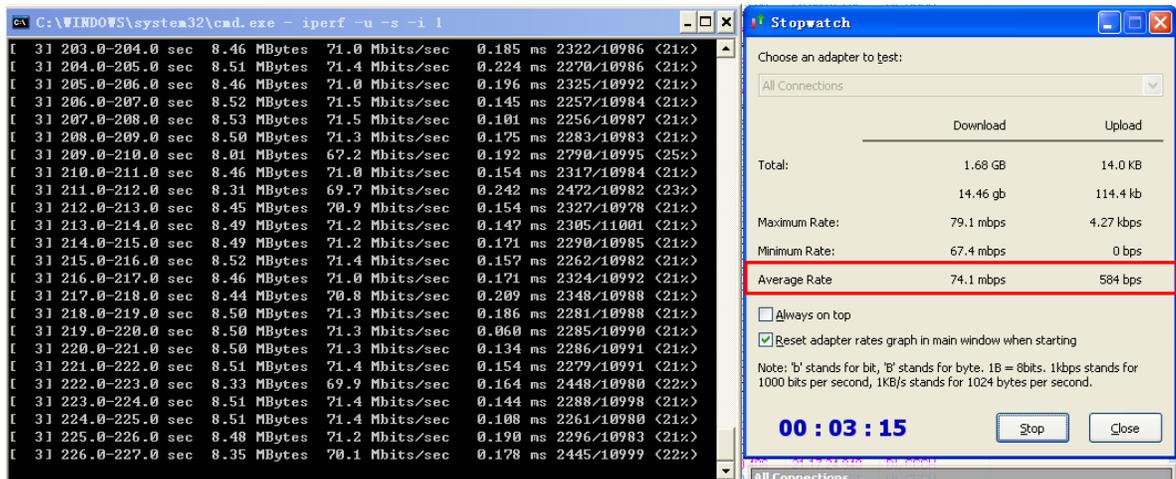


Figura 35. *Downlink* UDP con la configuración *2x2 Transmit Diversity*.

Fuente: DIGITEL.

Para *downlink* UDP con la configuración *2x2 MIMO* adaptativo:

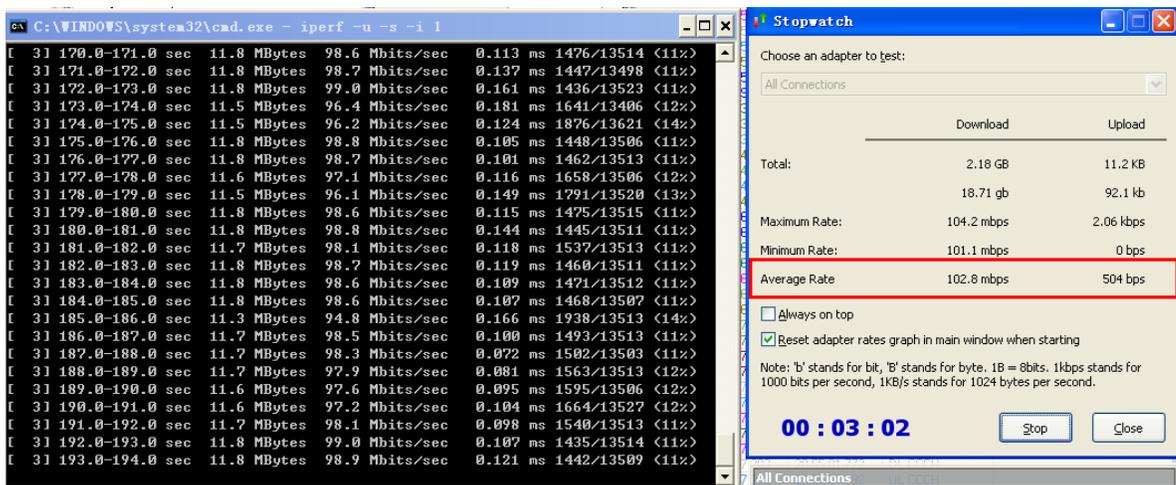


Figura 36. *Downlink* UDP con la configuración *2x2 MIMO* adaptativo.

Fuente: DIGITEL.

Se muestra la diferencia en cuanto a las velocidades máximas y promedio entre ambas configuraciones. La configuración con MIMO adaptativo es la más favorable obteniendo 28,7 Mbps mayor que su contraparte.

IV.2.2.2.3 Servicio de *uplink* FTP

El servicio se expresará mediante pruebas realizadas con el protocolo FTP en lugar de TCP, debido a la configuración del servidor. El servicio FTP es ofrecido por la capa de aplicación de TCP/IP y a su vez es el protocolo de transferencia de archivos que actúa sobre un sistema conectado a una red TCP.

Se ubicó el UE en un punto de buena señal, posterior a ello se procedió a confirmar la conexión con el servidor mediante MS-DOS y el comando PING, luego haciendo uso del programa *FileZilla* se procedió a cargar paquetes de gran tamaño desde el cliente al servidor durante un lapso de tiempo de 2 minutos.



Figura 37. Velocidades *uplink* FTP. Fuente: Propia.

Se obtuvo un valor promedio de 42,3 Mbps y valores picos de 47 Mbps, los cuales son muy cercanos a la velocidad máxima (50 Mbps) para el dispositivo de categoría 3.

IV.2.2.2.4 Servicio de *downlink* FTP

Se realizó el procedimiento ya visto anteriormente ubicando el UE en un punto de la celda con señal óptima y ejecutando el comando PING hacia el servidor, después de haber comprobado que existía conexión, se descargaron varios archivos de gran tamaño durante un lapso de 2 minutos.

Se presenta dos casos en donde el primero de ellos, se mantiene una configuración 2x2 MIMO adaptativo:

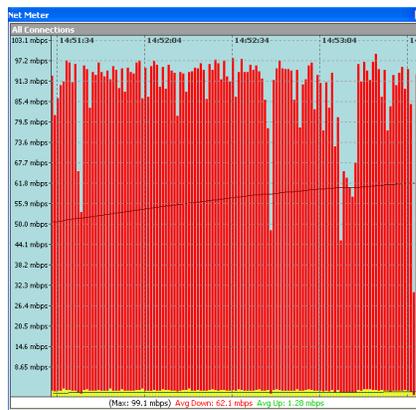


Figura 38. Velocidades para el *downlink* FTP 2x2 MIMO adaptativo. Fuente: Propia.

El segundo caso es una configuración 2x2 *Transmit Diversity*. La empresa suministró los siguientes resultados:

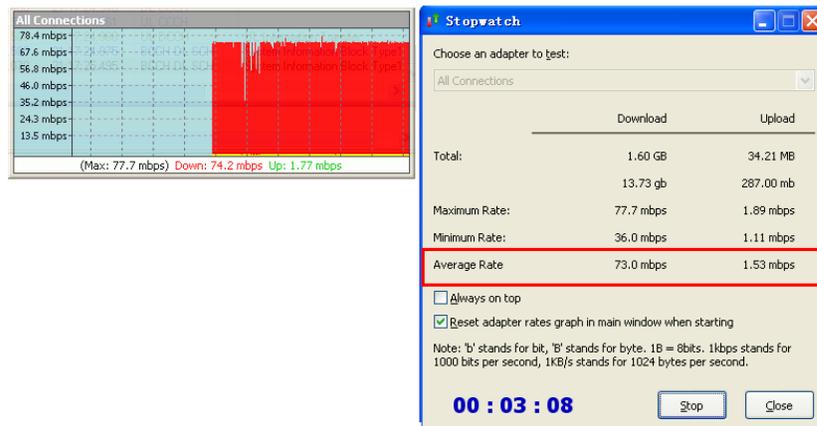


Figura 39. *Downlink* TCP con la configuración 2x2 *Transmit Diversity*.

Fuente: DIGITEL.

A pesar de ser una prueba empleando TCP y otra FTP, ambas pueden utilizarse por su similitud y a fines de los resultados no presenta ninguna influencia la discriminación entre ambos.

Se observa que las velocidades de FTP *downlink* con la configuración 2x2 MIMO adaptativo no alcanza los 100 Mbps, sino un promedio de 91,7 Mbps con picos máximos de 98,2 Mbps. La velocidad teórica no es alcanzada por la fidelidad y eficacia de los dispositivos intrínsecos en las mediciones. La configuración 2x2 MIMO adaptativa supera ampliamente a la configuración 2x2 *Transmit Diversity*, incluso cuando ésta ha sido medida con equipos de alta sensibilidad.

IV.2.2.2.3 Pruebas de capacidad de la celda

Para llevar a cabo las siguientes pruebas fue necesario el uso de dos UE (UE1 y UE2), de esta forma se verificó la capacidad de la celda.

IV.2.2.2.3.1 Uplink UDP throughput

Para la actual prueba se ubicaron los dos UE en un punto óptimo dentro de la celda que presta el servicio. Mediante el MS-DOS y el comando PING se realizó la conexión con el servidor. Haciendo uso de la herramienta IPERF se procedió a enviar paquetes UDP simultáneamente desde ambos UE al servidor. Se envió un hilo de ejecución para tráfico UDP a un ancho de banda de 100 Mbps durante 2 minutos.

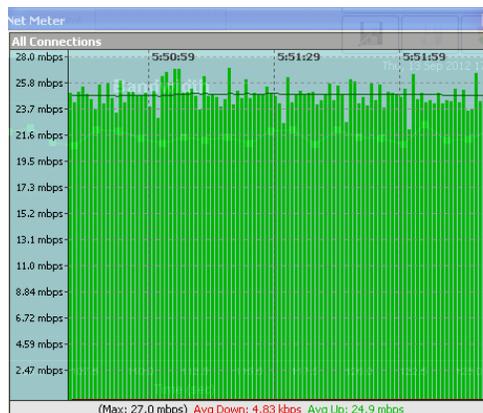


Figura 40. Velocidades *uplink* UDP del UE1. Fuente: Propia.

El valor pico obtenido para el UE1 fue de 27 Mbps y el valor promedio fue de 24,9 Mbps.

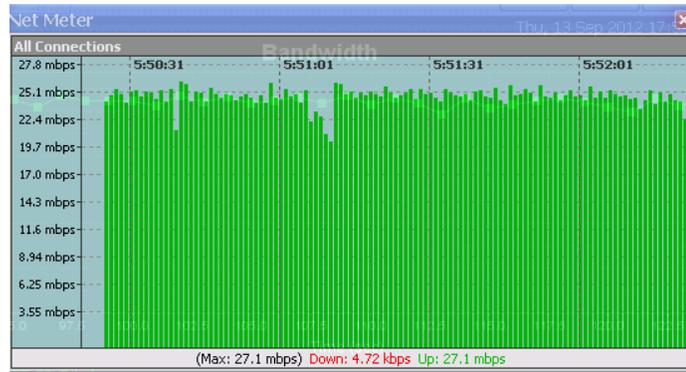


Figura 41. Velocidades *uplink* UDP del UE2. Fuente: Propia.

El valor pico obtenido para el UE2 fue de 26,1 Mbps y el valor promedio fue de 24,7 Mbps.

Debido a que el modem no alcanza velocidades de *uplink* superiores a 50 Mbps, las velocidades alcanzadas por cada UE son aproximadamente la mitad del valor teórico; es decir, el valor máximo del *throughput* es dividido entre los UE.

IV.2.2.2.3.2 *Downlink* UDP *throughput*

En esta prueba se suministraron los siguientes resultados por parte de la empresa. Para el pico de *downlink* UDP *throughput* con tres UE se obtuvo:

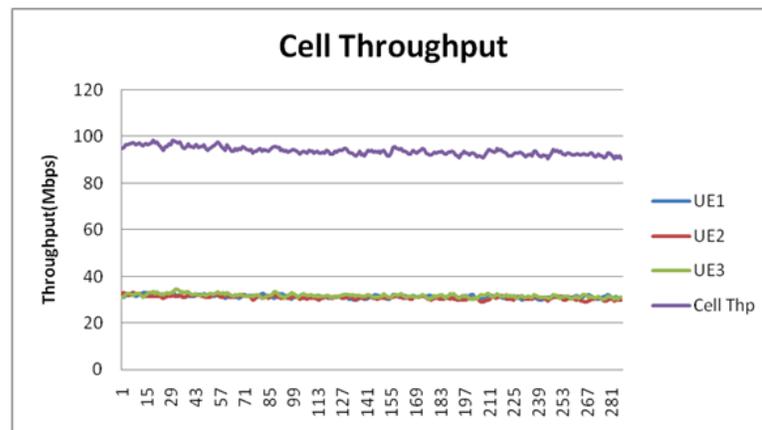


Figura 42. *Throughput* de la celda, UE1, UE2 y UE3. Fuente: DIGITEL.

En Figura 42 la se observa que el promedio del *throughput* para el *downlink* UDP es de 95 Mbps aproximadamente. También se puede apreciar que el valor que se obtuvo para cada UE es de 32 Mbps.

IV.2.2.2.3.3 Uplink FTP throughput

Se ubicaron los dos UE en un punto de buena señal, posterior a ello se procedió a confirmar la conexión de ambos con el servidor mediante MS-DOS y el comando PING. Con el programa *FileZilla* se procedió a cargar paquetes de gran tamaño desde ambos UE al servidor durante un lapso de tiempo de 90 segundos.

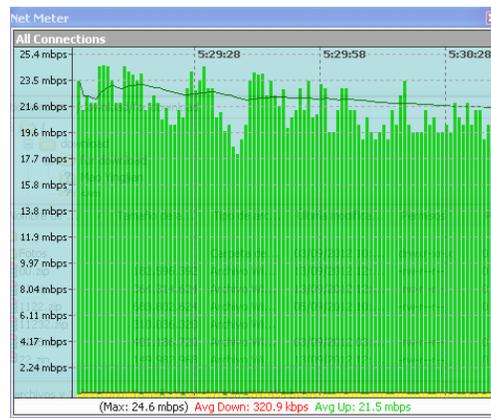


Figura 43. Velocidades *uplink* FTP del UE1. Fuente: Propia.

El valor pico obtenido para el UE1 fue de 24,6 Mbps y el valor promedio fue de 21,6 Mbps.

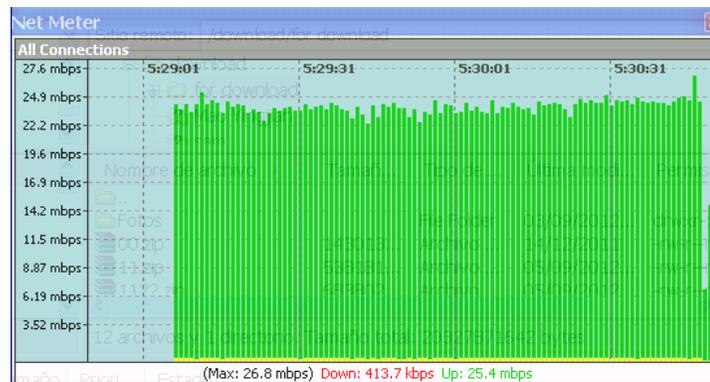


Figura 44. Velocidades *uplink* FTP del UE2. Fuente: Propia.

El valor pico obtenido para UE2 fue de 25,3 Mbps y el valor promedio fue de 24,0 Mbps.

IV.2.2.2.3.4 *Downlink FTP throughput*

Se realizó el procedimiento ya visto anteriormente ubicando los dos UE en un punto de la celda con buena señal y ejecutando el comando PING hacia el servidor. Posteriormente se descargaron simultáneamente varios archivos de gran tamaño desde ambos UE durante un lapso de 90 segundos.

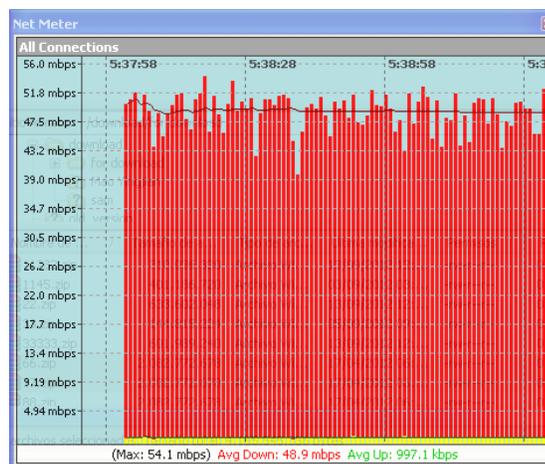


Figura 45. Velocidades *downlink* FTP del UE1. Fuente: Propia.

El valor pico obtenido para el UE1 fue de 54,1 Mbps y el valor promedio fue de 48,9 Mbps.

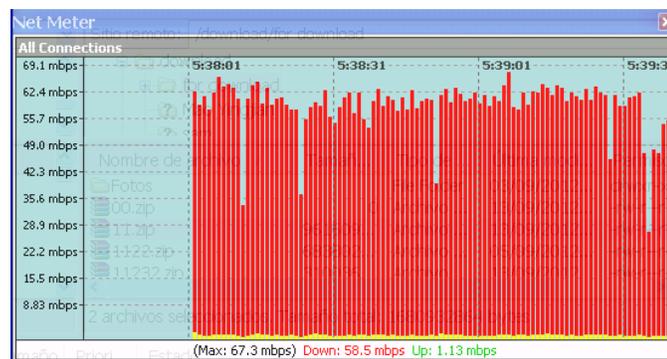


Figura 46. Velocidades *downlink* FTP del UE2. Fuente: Propia.

El valor pico obtenido para el UE2 fue de 67,3 Mbps y el valor promedio fue de 59,8 Mbps.

IV.2.2.2.4 Pruebas de cobertura

IV.2.2.2.4.1 Visión general de las pruebas

En la presente prueba se trazaron rutas en las adyacencias del Centro Banaven, en donde se observó el comportamiento del *throughput* en función de la distancia y obstáculos presentes en el recorrido (edificaciones, vehículos, entre otros) para ello se utilizaron laptops, el modem LTE y el *software FileZilla*.

Se realizó la conexión al servidor mediante el programa *FileZilla* y se procedió a realizar la descarga de archivos de gran tamaño. La movilización fue realizada en carro (*drive test*) y se detuvo en varios puntos del recorrido, manteniendo la descarga por un minuto y se tomaron los valores promedios de descarga.

Los datos obtenidos se plasmaron sobre un mapa de la zona, usando la aplicación *Google Maps* y asignándole un color según la escala de *throughput*.



Figura 47. Valores del *throughput* en la ruta recorrida. Fuente: Propia.

Se observa que los mejores valores de *throughput* se encuentran en una zona correspondiente al frente del edificio Torre Las Mercedes, concentrándose en una porción ovalada y a medida que se aleja de su centro el *throughput* desciende. De

igual manera se encuentra que a medida que se interponen obstáculos como son las edificaciones ubicadas en cada avenida y transversal, los valores obtenidos disminuyen radicalmente.

IV.2.2.3 Pruebas de experiencia del usuario

Pruebas que hacen alusión a todos aquellos elementos que están en contacto e interactúan con el usuario y su percepción deriva de la calidad de acceso a ciertos servicios comunes.

IV.2.2.3.1 Pruebas de servicios básicos

IV.2.2.3.1.1 Video streaming

Se ubica el UE en un punto que posea buena intensidad de señal, se comprueba el acceso al servidor con el comando PING y mediante el reproductor VCL se accede al archivo de video desde el lado del cliente y pasa a reproducirse a tiempo real.

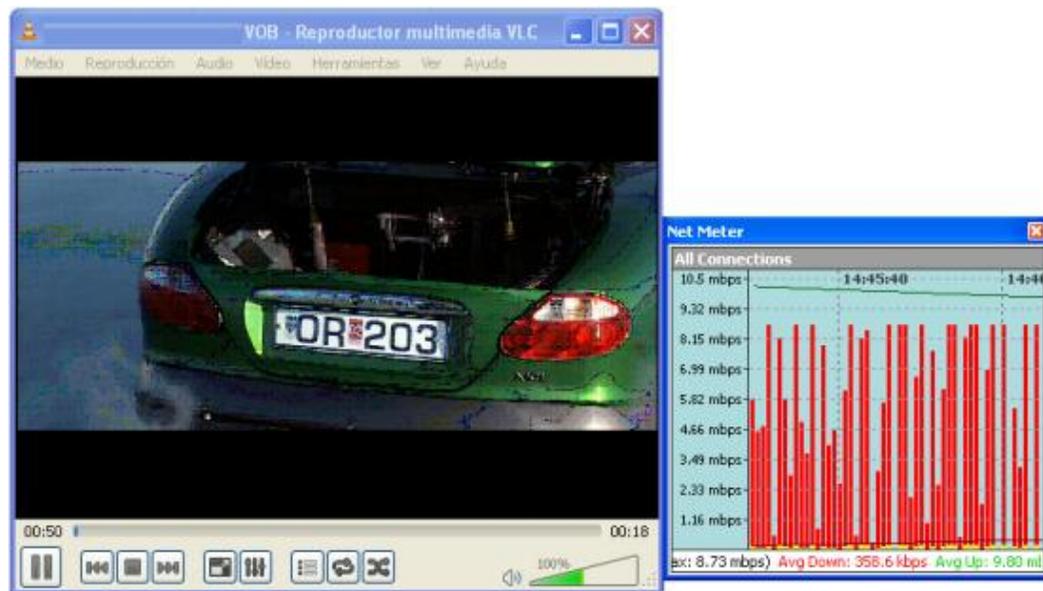


Figura 48. Servicio video *streaming*. Fuente: Propia.

Se puede observar el *throughput* mientras el video está siendo transmitido y reproducido a tiempo real. Las velocidades alcanzadas dependerán del requerimiento

del sistema, en este caso no se necesitó más de 9 Mbps ya que la reproducción no demandaba mayor ancho de banda.

IV.2.2.3.2 Pruebas de servicios de Internet

IV.2.2.3.2.1 Rendimiento del video *streaming*

Se ubica el UE en un punto con buena señal, se prueba la conexión con el servidor mediante el comando PING y se inició un servicio de video *streaming* desde la página de Internet www.youtube.com. Se eligió un video en HD y posterior se observó su comportamiento.



Figura 49. Rendimiento del video *streaming*. Fuente: Propia.

El video se ejecutó y se mostró correctamente. El único inconveniente fue que a medida aumentaba la calidad de video a HD1080 o incluso 3D, comenzaba a experimentarse cortes en la continuidad de la reproducción.

Este problema se debe a las características de la laptop, pues solo posee 1 GB de RAM y la tarjeta de video no soporta requerimientos de altas definiciones.

IV.2.2.3.2.2 Prueba de navegación a través de la web

Se ubicó el UE en un punto de buena señal, se comprueba la conexión ejecutando el comando PING hacia la dirección del servidor y se procede abrir la

página de <http://www.digitel.com.ve/Personas/Default.aspx> y se observa si el procedimiento es exitoso.



Figura 50. Prueba de rendimiento de *Web Browsing*. Fuente: Propia.

Se observó que la apertura de la página *Web* fue rápida y exitosa.

IV.3 Espectro de frecuencia a utilizar

La Comisión Nacional de Telecomunicaciones de Venezuela (CONATEL) es el organismo venezolano que ejerce la regulación, control y supervisión sobre las telecomunicaciones. Esta entidad es la encargada de asignar el espectro radioeléctrico de telefonía móvil a cada operadora del país por un tiempo determinado, según los requisitos establecidos en la Ley Orgánica de Telecomunicaciones.

Según el Artículo 2 Providencia Administrativa N° 1.879, CONATEL sólo podrá asignar las siguientes porciones del espectro radioeléctrico mediante el proceso de oferta pública: 1710 – 1770 MHz, 1805 – 1910 MHz, 1930 – 1990 MHz, 2110 – 2170 MHz, 2500 – 2690 MHz y 3400 – 3600 MHz.

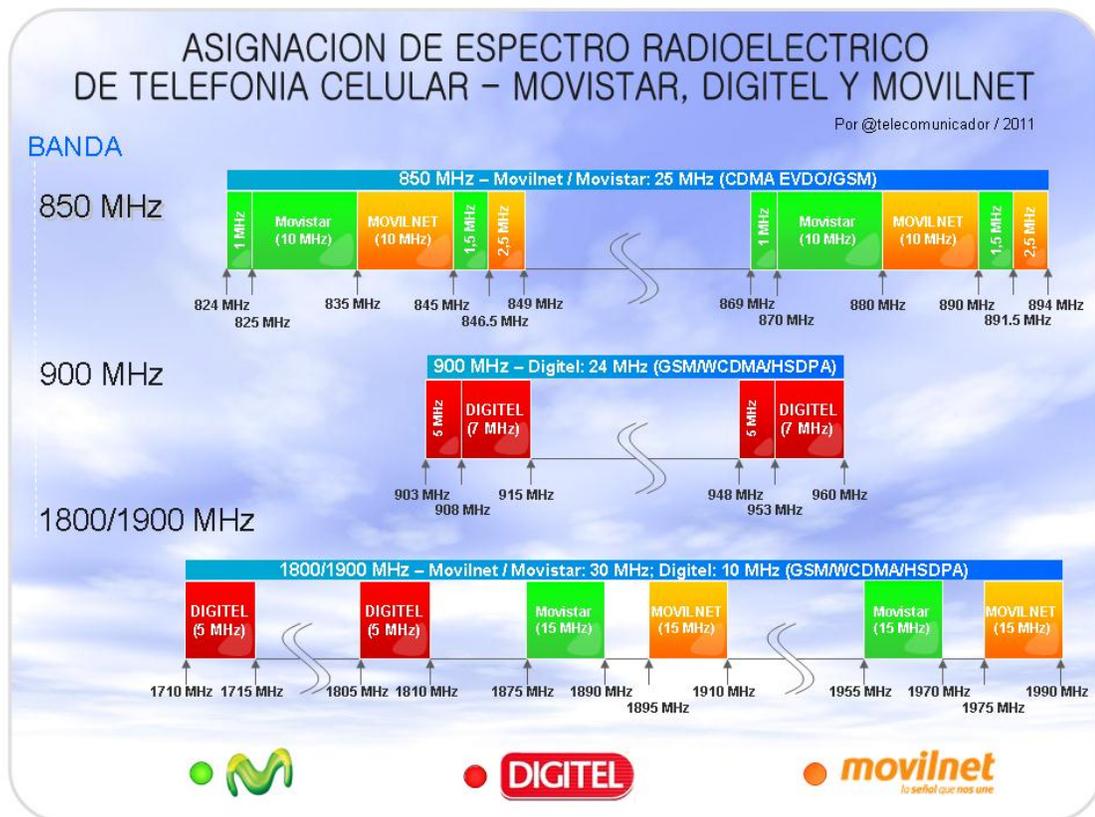


Figura 51. Espectro radioeléctrico de las operadoras en Venezuela.

Fuente: <http://4gmb.wordpress.com>.

En la Figura 51 se observa la distribución del espectro radioeléctrico por parte de CONATEL, en donde la Corporación DIGITEL sólo utiliza 5 MHz en la banda de 1800 MHz. Adicionalmente se está licitando la compra del bloque F-F'' correspondiente a las frecuencias 1810-1825 MHz de *downlink* pareado con 1715-1730 MHz de *uplink* para un total de 30 MHz de espectro. Cada enlace abarca 15 MHz de los cuales 5 MHz agrupan 25 canales para GSM y los 10 MHz restantes están destinados a una portadora LTE.

Debido a que no existe un estándar en cuanto al uso de las bandas de frecuencia para LTE, los dispositivos móviles son fabricados para trabajar con la frecuencia utilizada en el país de destino, lo cual genera inconvenientes de compatibilidad para usar un determinado dispositivo móvil.

Los dispositivos móviles son ensamblados para operar a una determinada frecuencia y luego ser vendidos por grandes lotes. Digitel opera en la banda de 900/1800 MHz por lo que se requerirá hacer un pedido de equipos capacitados a operar a dicha frecuencia. Es por este motivo que a fin de reducir los costos, sería conveniente una asociación con países cercanos que posean la misma designación de espectro para LTE.

Actualmente, los países a nivel mundial que implementaron la tecnología LTE en la banda de 1800 MHz son: Polonia, Finlandia, Hong Kong (China), Suecia, Dinamarca, Estonia, Lituania, Bélgica, Alemania, Australia, Singapur, Hungría, Corea del Sur, Emiratos Árabes Unidos, Croacia, Japón, Angola, República Checa, Arabia Saudita, Eslovaquia, Filipinas.

Por otro lado, las bandas de frecuencia que se planifican utilizar para implementar la tecnología LTE en América Latina son:

- Banda de 700 MHz: Puerto Rico, Nicaragua, México, Perú, Bolivia.
- Banda de 800 MHz: Guatemala.
- Banda de 1700 MHz: Uruguay.
- Banda de 1800 MHz: Guatemala, Brasil.
- Banda de 2100 MHz: Guatemala, México, Argentina.
- Banda de 2600 MHz: Chile, México.
- Espectro AWS (1700 MHz para *uplink* y 2100 MHz para *downlink*): Argentina, Colombia, Guatemala, Perú.

En Brasil y Colombia, LTE ya está implementado en la banda 2600 MHz, y en Uruguay en la banda de 2100 MHz.

Dada la diferencia de frecuencia de operación en cada país, se ha observado la existencia de problemas con el *roaming* internacional. Se ha propuesto el homologar una banda disponible para el *roaming*, como por ejemplo en la banda de 2600 MHz que es la más común, pero aún no se ha llegado a ningún acuerdo.

En el Apéndice A se pueden observar todos los países que implementaron LTE y sus específicas bandas de frecuencia.

IV.3.1 Ventajas de LTE en la banda de 1800 MHz

La creciente demanda por el espectro de frecuencia situó a la empresa en la necesidad de expandir su espectro a lo cual se solicitó la banda de 1800 MHz.

LTE siendo una tecnología que incluye elementos de calidad de servicio, manejo y gestión de tráfico converge a una alta eficiencia espectral en contraposición a las tecnologías de 2G/3G, lo cual le permite situarse en espectros más altos aprovechando las bandas disponibles. Entre los factores que influyen en la eficiencia espectral se encuentran la latencia y el *throughput*.

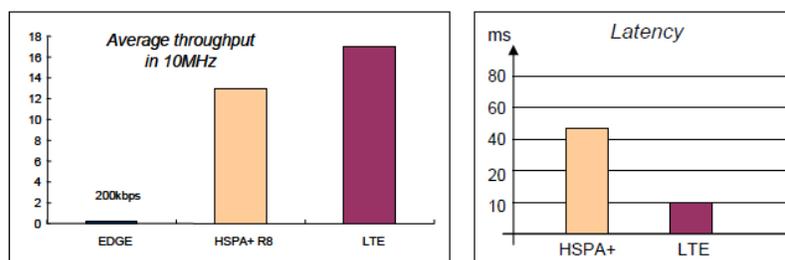


Figura 52. Elementos de la eficiencia espectral. Fuente: LTE 1800MHz Ecosystem Drivers, Huawei.

Según la Asociación Mundial GSM, la implementación en la banda de 1800 MHz está tomando ventaja en el mundo, pues ha quedado demostrado que se logra una cobertura de más del doble al usar esa banda y no la de 2600 MHz, lo cual genera un beneficio económico para el operador en términos de inversiones.

IV.4 Integración al estándar LTE

IV.4.1 Integración a la arquitectura de la red LTE

La migración de las tecnologías hacia LTE es un proceso cuyo costo dependerá de la lejanía de estas hacia la nueva generación, por lo cual una migración

que corresponda de GSM a LTE incide en un establecimiento de nuevos equipos e interfaces a gran escala.

La solución más viable corresponde a una migración paulatina de las tecnologías, evolucionando desde la red GSM hacia las redes GPRS, EDGE, UMTS, HSDPA, HSUPA, HSPA+ y LTE.

El primer paso a seguir para lograr el cometido corresponde a establecer GSM/EDGE, para lo cual se requiere la adquisición de dos nodos: GGSN y SGSN. La conexión de estos nodos se realiza de la siguiente manera:

- Se conecta la BSC con SGSN mediante la interfaz Gb, la cual lidia con datos del plano de usuario en conjunto con datos de señalización y control.
- Se interconectan los nodos GGSN y SGSN con la interfaz Gn que maneja los mismos tipos de datos que la interfaz Gb.
- Se conecta el MSC con SGSN a través de la interfaz Gs, que trata con datos de señalización y control.

Posteriormente para migrar de la tecnología EDGE (2G) a la tecnología UMTS (3G) es necesaria la inclusión de dos nuevos elementos: Nodo B y el RNC (*Radio Network Controller*). La red de radio acceso pasa a llamarse UTRAN y está compuesta por Nodos B que se conectan al RNC. Se presenta la necesidad de crear dos interfaces para la conexión de estos nuevos elementos:

- Interfaz Iub: conecta al RNC con el Nodo B. Transmite información del plano de usuario, de control y señalización.
- Interfaz Iu-CS: media la conexión con la red de conmutación de circuitos. Esta se divide en dos según el equipo a la cual se conecte:
 - RNC – MSC: media información de control y señalización.
 - RNC – CS-MGW: establece la transferencia de los datos del plano de usuario.

- Interfaz Iu-PS: correspondiente a la conexión con la red de conmutación de paquetes, cuyo equipo terminal es la SGSN. Maneja información del plano de usuario y de control.

En el sistema LTE la red de radio acceso se denomina E-UTRAN, en donde la arquitectura es simplificada en comparación al UTRAN eliminando el RNC y delegando sus funciones a la estación base que se denomina eNB (*Evolved Node B*) y hacia el núcleo (*core*) de la red. Las interfaces que corresponden a esta arquitectura para lograr la integración son: S1, X2, S6a, S3, S4.

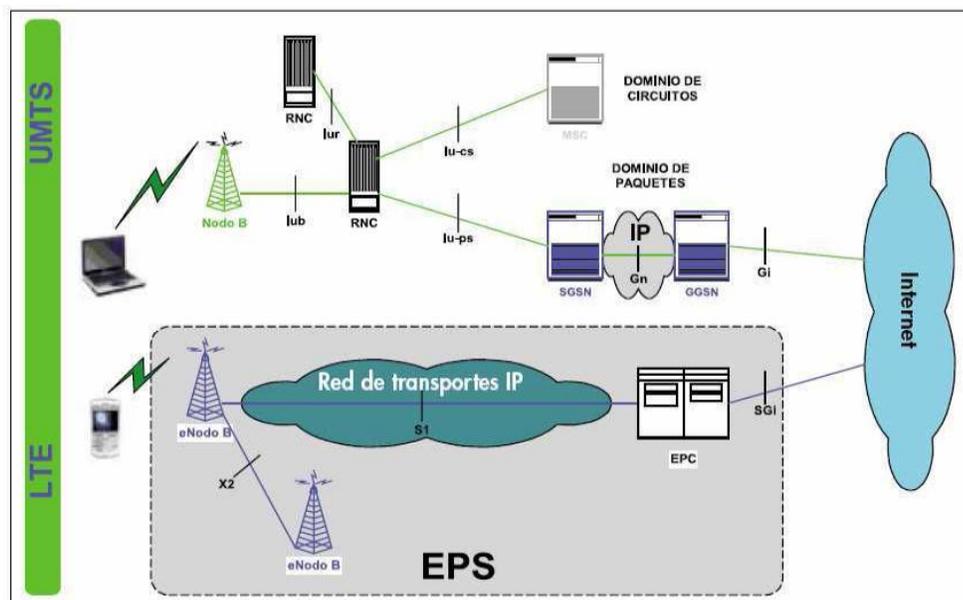


Figura 53. Diferencias entre la arquitectura de la red UMTS y la red LTE. Fuente: LTE/SAE, una apuesta segura en la evolución de las redes móviles.

Se presenta la necesidad de sustituir algunos elementos:

- En el plano de control el SGSN pasa a ser denominado MME.
- En el plano de usuario se elimina el GGSN y sus funciones las asume el P-GW.
- Se agrega una nueva entidad llamada S-GW que asume algunas funciones del SGSN y del RNC.

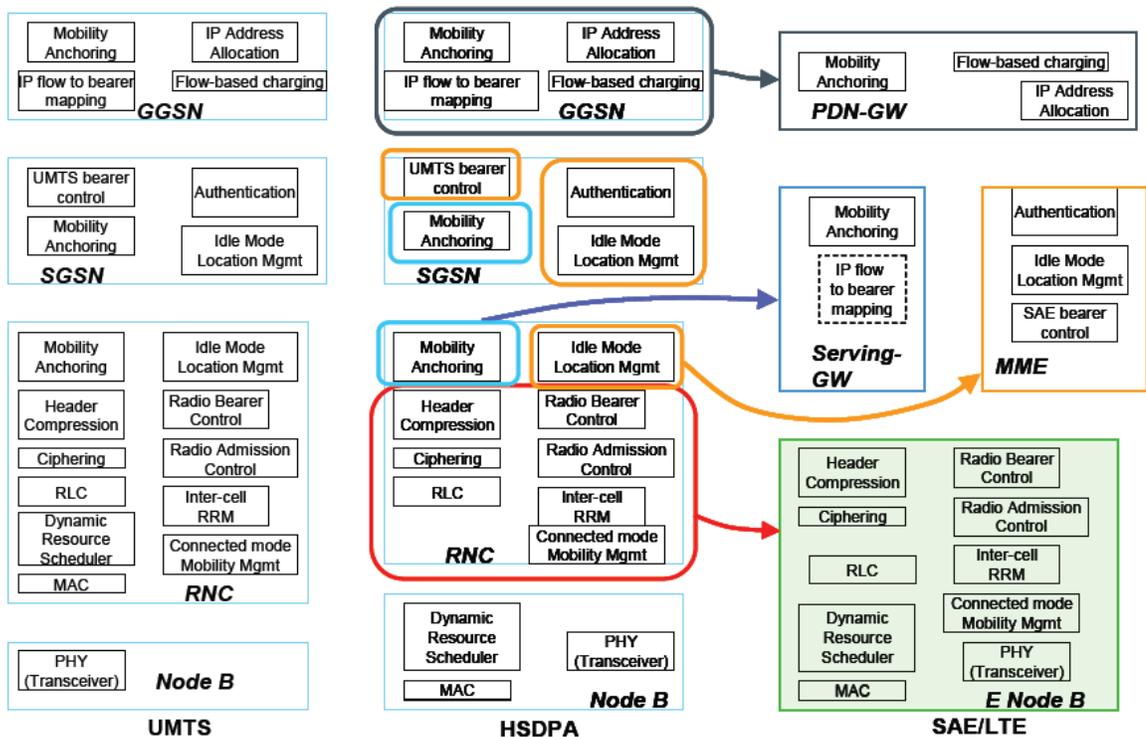


Figura 54. Migración de UMTS a LTE. Fuente: UMTS/HSPA to LTE Migration.

IV.4.2 Soluciones para servicios de voz y datos

Al implementar la tecnología LTE, las operadoras tienen tres opciones a considerar según los servicios que pueden ofrecer:

- Servicios de datos en LTE y voz en 2G/3G.
- Servicios de datos en LTE.
- Servicios de voz y datos en LTE.

IV.4.2.1 CSFB (*Circuit Switched Fallback*)

El CSFB es una solución aplicable a las redes LTE para proveer servicios de voz utilizando de intermediario a las redes 2G/3G. Conformar la solución más simple, que a la vez es provechosa para dispositivos como módems, laptops, entre otros; pues en estos casos el servicio de voz puede que no sea necesario.

Para realizar esta conexión se requiere que elementos de la red como el MME, MSC y el VLR estén interconectados por interfaces. También requiere que sus equipos terminales y estaciones base estén capacitados para el CSFB.

La conexión principal se realiza entre el MME y el MSC y es mediada por la interfaz SGs; a través de ella se envía información sobre el manejo de la movilidad y localización entre las redes de conmutación de circuitos y de paquetes.

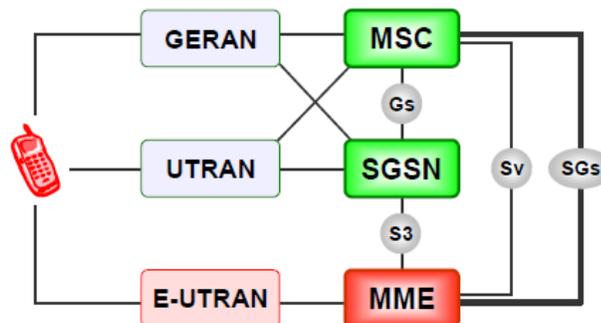


Figura 55. Arquitectura CS-Fallback. Fuente: CSFB and SMSoSGs, LELIWA.

Cuando ocurre una llamada de voz que incluya a la red LTE, la misma envía información del usuario al dominio de circuitos correspondiente a su localización e introduce la presencia de una llamada de voz realizada por un terminal capacitado. El dispositivo del usuario media con el MME, indicadores de CSFB y actualiza la posición en la red CS, específicamente a la MSC / VLR.

Una vez ocurrido esto, el eNB gestiona el proceso de traspaso a la red destino, estableciéndose la llamada. Sobre una sesión de llamada, la prioridad se establece sobre la comunicación de voz delegando a segundo plano una sesión de paquetes; a menos que la red pueda mantener ambas sesiones y el sistema de conmutación de circuitos se encarga de soportarlas.

Ventajas del *fallback handover*

- No es necesario ofrecer calidad de servicio en el sistema pues al realizar el cambio entre redes y operar en 2G/3G, éstas ya poseen el QoS.

- Se aprovecha la capacidad de las redes 2G/3G para ofrecer servicios de voz sin necesidad de implementar una red IMS, lo cual evita los altos costos.

IV.4.2.2 SR-VCC (*Single Radio Voice Call Continuity*)

El SR-VCC brinda una implementación para otorgar servicios de voz a redes LTE a través de IMS, pero a su vez no posee una cobertura total sobre LTE.

Ofrece una comunicación continua entre las redes 2G/3G y LTE, sin que se alteren los servicios utilizados y de manera que todo suceda de forma transparente al usuario. Las sesiones establecidas durante la llamada se conservan durante el *handover*, incluso en escenarios donde los servicios son comprometidos.

Los requisitos para realizar el SR-VCC son:

- Establecimiento de la interfaz Sv que conecta al MME con el MSC.
- Actualización del MSC para que sea capaz de soportar los procedimientos del SR-VCC.

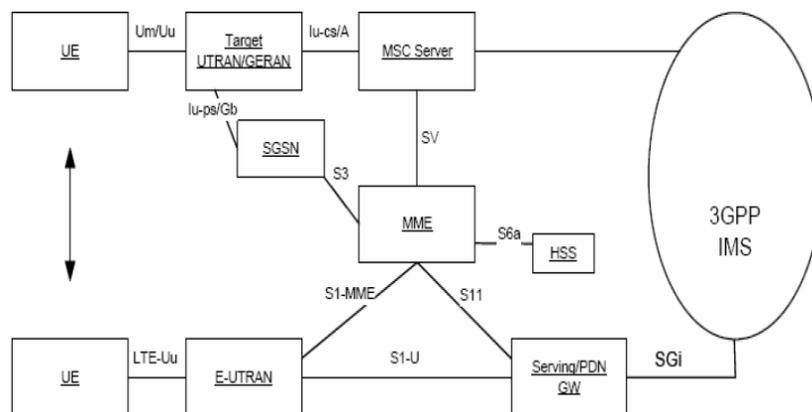


Figura 56. Redes con arquitectura.

Fuente: <http://www.mbcom.cn/Feature/ShowArticle.aspx?ID=1352>

SR-VCC descarta la necesidad de que el equipo del usuario acceda al mismo tiempo a dos señales pertenecientes a diferentes tecnologías. De cierta manera brinda numerosas ventajas y satisface los requerimientos de continuidad durante el

handover, pero existen escenarios dentro del *Release 8* donde la sesión se interrumpe o se reducen las capacidades del sistema.

IV.4.2.3 *One Voice*

Fue concebida como una iniciativa que buscaba identificar los requerimientos base para implementar voz y SMS sobre LTE, empleando una red IMS.

El establecimiento de una red IMS implica costos elevados de implementación pero a la vez se debe tener presente que es una red patrocinada por la 3GPP/3GPP2 en conjunto a los principales organismos de estandarización ITU y ANSI.

IV.4.2.4 VOLGA (*Voice Over LTE via Generic Access*)

Es una solución que permite brindar servicios de voz y SMS a las redes LTE. Fue desarrollado por *Volga Forum* y centra su función en la instalación de un nuevo elemento de red denominado VANC, el cual se basa en una versión de 3GPP modificada de GANC (*Generic Access Network Controller*) que soporta el servicio de voz mediante la creación de túneles IP.

La opción VOLGA culminó en el año 2009.

IV.5 Tecnologías competidoras

A pesar de que las redes GSM/HSPA son las que predominan en el mundo de la telefonía móvil, las operadoras están desarrollando otras tecnologías móviles.

IV.5.1 CDMA2000

Se considera que CDMA2000 es la contraparte de la tecnología GSM desarrollada en varios países del mundo. Esta se basa en versiones de *One Carrier Radio Transmission Technology* (1xRTT) y *One Carrier-Evolved Data-Optimized* (1xEV-DO).

CDMA2000 ha mejorado su servicio ofreciendo transferencia simultánea de voz y datos mediante la capacidad adquirida de *Simultaneous 1X Voice* y *EV-DO Data*, llamada SVDO, pues de manera análoga se puede adquirir la cualidad de tener *1X Voice* en conjunto a sesiones de data en base a LTE empleando *Simultaneous Voice and LTE (SVLTE)*.

Hasta los momentos no hay comunicados de ningún operador que planea emplear VoIP para EV-DO.

Existen varios planes para mejorar CDMA2000 1xRTT hacia una versión llamada *1X Advanced*, la cual incrementará la capacidad de voz.

IV.5.2 WiMAX

La tecnología WiMAX surgió como una alternativa de nueva generación a las tecnologías celulares para conexiones inalámbricas. Basada en la tecnología de acceso OFDMA bajo el nombre WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*).

WiMAX se ubicó en el mercado ofreciendo mayores capacidades y eficiencia en comparación a las tecnologías competidoras. Sin embargo para el caso de *WiMAX Mobile* no se tuvo el éxito esperado, ya que a pesar de ser una tecnología que se estuvo desplegando, las operadoras continuaron utilizando los servicios de HSPA lo cual contribuyó a la aceleración y evolución de la tecnología a LTE. Es por ello que las ventajas aparentes de WiMAX no sirvieron de sustento ante la tendencia de las operadoras.

En Venezuela esta tecnología se implementó por la empresa Movilmax en el 2007, y trabaja en la banda 2,5 GHz. Hoy cuenta hoy con 64 radio bases en Caracas y unos 5 mil usuarios en la zona.

La comparación de las tecnologías LTE y WiMAX se puede observar en el Anexo A de este proyecto.

IV.5.3 LTE-Advanced

LTE-Advanced corresponde a la tecnología LTE la cual emplea direccionamiento IMT-Advanced, especificado en el *Release 10*.

Esta tecnología posee la característica de inter-compatibilidad con la red LTE, lo cual brinda el beneficio de disfrutar las ventajas de la nueva tecnología con los dispositivos LTE. De la misma manera los nuevos dispositivos correspondientes a LTE-Advanced operarán en las antiguas redes LTE.

Entre los elementos más destacados LTE- Advanced son:

- Agregación de portadoras en espectros discontinuos.
- Mayores velocidades de descarga mediante la aplicación de antenas MIMO de alto orden (hasta 8x8) y de MIMO multiusuario.
- Para la transmisión *uplink* mediante MIMO monousuario de hasta 4x4, se emplean dos antenas transmisoras en el dispositivo.
- Transmisión coordinada multipunto (CoMP) dada en el *Release 11*.
- Soporte a las redes heterogéneas (Het-net), que incluyen *enhanced Inter-Cell Interference Coordination* (eICIC).
- *Relays*.
- Permite comunicaciones multi-salto para aumento de la cobertura, para el *backhauling* y mejoramiento del desempeño en el borde de las celdas.
- Compatibilidad de espectro con LTE.

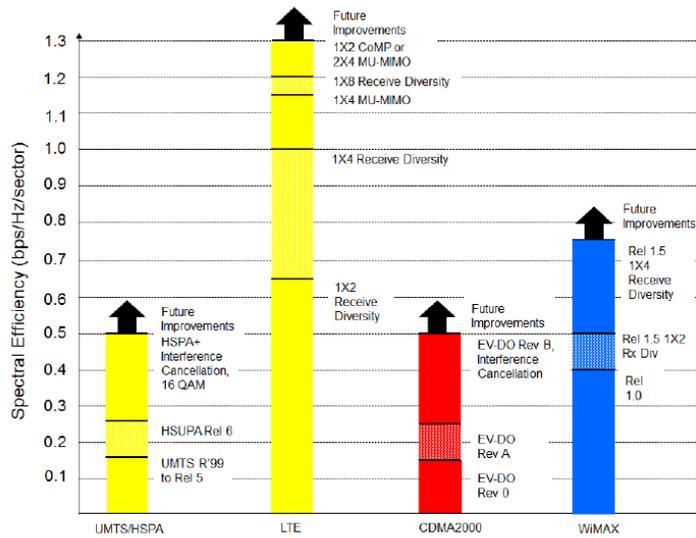


Figura 57. Comparación de la eficiencia espectral para *uplink*. Fuente: Mobile Broadband Explosion, 4G Americas.

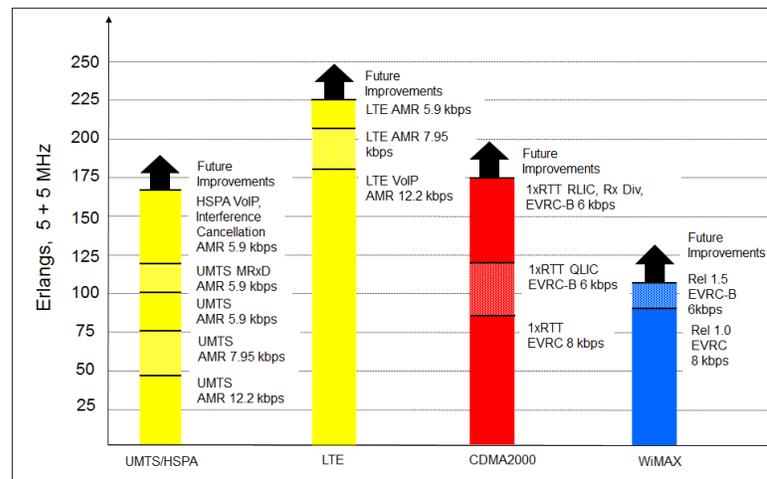


Figura 58. Comparación de la eficiencia espectral para voz. Fuente: Mobile Broadband Explosion, 4G Americas.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

El siguiente capítulo posee información pertinente a los resultados de la investigación documental para implementar una red LTE y las pruebas piloto realizadas. De igual manera se plasma las conjeturas a partir de las investigaciones documentales llevadas a cabo por los tesisistas. Se mencionará cada resultado puntual obtenido en las pruebas de funcionalidad, pruebas de rendimiento de la red y pruebas de experiencia del usuario.

V.1 Descripción de la red interna LTE de la Corporación DIGITEL

Se muestran las siguientes características generales:

- La red LTE de la Corporación DIGITEL se basa en las recomendaciones de la 3GPP en el *Release 8*.
- La red posee divisiones físicas y lógicas, de acuerdo a funciones y transporte de datos para mejorar el rendimiento según la ingeniería de red.
- Los datos que se transmiten por las redes se dividen en plano de usuario y plano de control.
- Para establecer la red LTE se necesita adquirir los equipos P-GW, S-GW y MME. Se utilizan las radio bases ya instaladas mediante actualizaciones y capacitaciones de las funciones. El conjunto de dispositivos EiR, HLR y AuC pasan a denominarse HSS a la vista de la red LTE.
- Se añaden nuevas interfaces las cuales disciernen en su nombre debido a la actualización del *Release 8* en el mes de junio.
- La interconexión de los eNB a los centros de conmutación se realiza mediante intermediarios según sea su constitución por capas y capacidad de manejo del tráfico:
 - *Backhaul*.

- *Backbone* que a su vez se divide en nodos de agregación y el núcleo donde se encuentran las conexiones de gran medida de tráfico y equipos.
- Se introduce la entidad denominada STP para la interconexión de los equipos dentro del núcleo de la red y la distribución de la señalización.
- El desempeño del sistema está orientado a la monitorización y almacenamiento de variables dadas por indicadores de desempeño.
- Se espera que al cabo de 5 años se tengan una cantidad de 240.000 usuarios en la red, la cual manejará hasta 50.000 *Erlangs*.
- Para manejar la disponibilidad del sistema LTE se recurre a los parámetros MTTF, dado por el fabricante, y MTTR corresponde al tiempo que se tarda en arreglar un sistema.
- La indisponibilidad es 0,42418 horas/año correspondiendo a que el sistema tendrá una disponibilidad del 99,995%, lo cual es considerado como un sistema de alta disponibilidad.
- Las radio bases tienen la capacidad de transmisiones de hasta 150 Mbps y 75 Mbps de promedio mediante una portadora de 10 MHz.
- LTE se ubica en 1720-1730 MHz en su enlace ascendente mediante SC-FDMA como técnica de acceso. Para el enlace descendente utiliza OFDMA ubicado en 1815-1825 MHz.

V.2 Pruebas generales

- Las velocidades dependen de la cantidad de los equipos en estado activo en la red.
- La categoría del dispositivo es una variable que afecta el desenvolvimiento de las capacidades de la red, si ésta en la disponibilidad de ofrecer un ancho de banda mayor al que soporta el UE.

V.2.1 Pruebas de funcionalidad

V.2.1.1 Pruebas de funcionalidades básicas

- **Soporte para celdas a velocidades predeterminadas**
 - Se evidencia que la red soporta las distintas velocidades propuestas hasta un máximo de 90 Mbps.
 - Las velocidades dependen de la eficiencia y categoría de los equipos.
 - La velocidad de *uplink* alcanzan un equivalente a la mitad del valor esperado (43 Mbps) pues es un dispositivo de categoría 3.

V.2.1.2 Pruebas de *handover*

- **Intra eNB *handover***
 - Se evidencia que el valor del *throughput* disminuye momentáneamente cada vez que se realiza el intra eNB *handover*.
 - Los casos de intra *handover* que se pudieron presentar son:
 - ✓ Lóbulo de la celda A – lóbulo de la celda B.
 - ✓ Entre dos lóbulos de la misma celda.
 - No se puede determinar en cual lóbulo/celda se encontraba el UE. Solo se puede observar los cambios al momento del *handover*.

V.2.1.3 Pruebas de calidad de servicio

- **Prueba de complicación de servicio**
 - La velocidad de descarga aumenta al requerir más ancho de banda, debido a la activación de la descarga de video *streaming*.
 - Se favorece al servicio UDP manteniendo la calidad de descarga, viéndose afectado el video *streaming*; (siguiendo el comportamiento señalado al configurar el GBR).

- Se obtiene que el sistema trabaja exitosamente con parámetros por orden de prioridad para asegurar la calidad de servicio.

- **Prueba de downlink con *torrent***

- La descarga desde un servidor *torrent* alcanza una velocidad promedio de 29,3 Mbps.
- Se permite la descarga de archivos directamente desde servidores externos y se observa que la velocidad de *download* se presenta en altos valores.

V.2.2 Pruebas de rendimiento

V.2.2.1 Pruebas de latencia

- **Latencia Plano de Usuario**

- Las latencias promedio oscilan en 13ms para 32 Bytes, 15ms para 1000 Bytes y 14ms para 1500 Bytes.
- Los valores obtenidos no cumplen con el estándar de mantener la latencia a valores menores a 10ms.
- La latencia aumenta a medida que el tamaño de los paquetes de datos son mayores.

- **Latencia de modo *idle* a modo activo**

- Los valores obtenidos de latencia se sitúan alrededor de los 70,4 ms.
- El resultado se encuentra aproximadamente 30 ms por debajo de la latencia máxima señalada en el *Release 8* sobre cambio de estado, lo cual es una buena diferencia.

V.2.2.2 Pruebas de medición del DL/UL *throughput* con un UE

- **Servicio de *uplink* UDP**
 - A pesar de que se trabaja con dispositivos de categoría 3, por configuración de la red el UDP *uplink* se encuentra limitado a 25 Mbps.
 - El servicio alcanza el valor de velocidad máximo permitido para UDP *uplink*.

- **Servicio de *downlink* UDP**
 - El rendimiento del equipo influye en gran parte sobre la velocidad de transmisión, ya que se pierde velocidad en funciones internas.
 - La configuración 2*2 MIMO adaptativa es la mejor opción.
 - La configuración MIMO tiene una velocidad promedio de 102,8 Mbps.
 - La configuración *Transmit Diversity* tiene una velocidad promedio de 74,1 Mbps.

- **Servicio de *uplink* FTP**
 - El desempeño del equipo influye en la velocidad produciendo que se mitigue, lo cual impide alcanzar los valores máximos teóricos.
 - El valor promedio es de 42,3 Mbps.

- **Servicio de *downlink* FTP**
 - La configuración 2*2 MIMO tiene la marca de velocidad promedio mayor con 91,7 Mbps.
 - La configuración 2*2 *Transmit Diversity* es de 73 Mbps.
 - La configuración 2*2 MIMO adaptativo mostró los valores apremiantes en comparación a su contraparte.

V.2.2.3 Pruebas de capacidad de la celda

- ***Uplink UDP throughput***
 - El valor total de velocidad máxima para UDP *uplink* es dividido entre la cantidad de UE existentes en una misma celda.
 - El valor promedio de UE1 es de 24,9 Mbps.
 - El valor promedio de UE2 es de 24,7 Mbps.
 - La delimitante de velocidad del *uplink* UDP solo afecta conexiones superiores a los 25 Mbps, por lo cual al dividirse la velocidad no hubo necesidad por parte del sistema de aplicar dicha restricción.
 - La distribución de la velocidad se lleva a cabo en partes iguales, que conforman la capacidad total de la celda.

- ***Downlink UDP throughput***
 - El promedio del *throughput* para el *downlink* UDP es de 95 Mbps.
 - El valor para cada UE es de 32 Mbps.
 - La distribución de velocidad descarga en unísona en cada dispositivo.

- ***Uplink FTP throughput***
 - El valor promedio de UE1 es de 21,6 Mbps.
 - El valor promedio de UE2 es de 24,0 Mbps.
 - Las velocidades de los UE conforman la velocidad máxima que puede ofrecer un dispositivo de categoría 3 en la red.

- ***Downlink FTP throughput***
 - El valor promedio de UE1 es de 48,9 Mbps.
 - El valor promedio de UE2 es de 59,8 Mbps.
 - Se observa que la distribución de las velocidades entre ambos dispositivos es un mínimo cercano a los 50 Mbps en cada uno.

- Al sumar el valor promedio de *downlink* del UE1 y el UE2 se obtiene un *throughput* de 118,7 Mbps, el cual es mayor al valor alcanzado cuando hay un solo UE en la red.
- Se obtienen mejores resultados si se emplean varios UEs, ya que al sumar las velocidades *downlink* se superan los 100 Mbps del estándar.

V.2.2.4 Pruebas de cobertura

- Los valores más altos de velocidad de descarga se obtienen en los alrededores de los edificios UNEFA, BANAVEN y CCCT; en conformidad a la ubicación y orientación de las antenas.
- Los UE después de superar cierta distancia, en conjunto a las atenuaciones ocasionadas por los obstáculos, pierden abruptamente la velocidad de descarga.
- Una vez perdida la velocidad de descarga es necesario reiniciar el servicio manualmente. Esto es asociado al modem LTE y su configuración.

V.2.3 Pruebas de experiencia del usuario

V.2.3.1 Pruebas de servicios básicos

- **Video *streaming***
 - Soporta video *streaming*.
 - Las velocidades dependerán del requerimiento del video.

V.2.3.2 Prueba de servicios de Internet

- **Rendimiento *streaming***
 - El sistema soporta video *streaming* mediante el *Web Browsing*.
 - La calidad de la reproducción dependerá de las especificaciones tanto del *hardware* como del *software* que posea la laptop.

- **Prueba de navegación a través de la web**

- La apertura de la página web fue rápida y exitosa.
- La velocidad para navegar dependerá de la calidad de los servicios solicitados en la página web y de las capacidades o disponibilidad de ancho de banda que la misma pueda ceder.

V.3 Espectro de frecuencia a utilizar

- Según CONATEL, el espectro radioeléctrico de 1805-1910 MHz se encuentra disponible para la asignación mediante el proceso de oferta pública.
- La Corporación DIGITEL licita 30 MHz del bloque F-F'; correspondiente a las frecuencias 1810-1825 MHz para el *downlink* y 1715-1730 MHz para el *uplink*.
- 10 MHz están destinados a GSM y 20 MHz a LTE.
- Las bandas de frecuencias 2600 MHz y 1800 MHz son las más comunes a utilizar a nivel mundial.
- En América Latina sólo tres países tienen implementada la tecnología LTE.
- Es necesaria una homologación de bandas para lograr el *roaming* internacional.

V.4 Integración al estándar LTE

- La migración desde la red GSM (2G) hacia la red LTE (4G) se realiza mediante la evolución de las tecnologías 2G a 3G y posteriormente a 4G.
- Para evolucionar desde GSM a EDGE es necesaria la integración de los nodos GGSN y SGSN.
- Para migrar desde EDGE a UMTS se requieren los elementos Nodo B y RNC.
- Al cambiar la tecnología UMTS por la tecnología LTE, se crean las entidades MME, S-GW y P-GW.

- Al momento de evolucionar la red, siempre es necesaria la creación de nuevas interfaces para lograr la interconexión con las tecnologías anteriores.
- La arquitectura de la red de radio acceso E-UTRAN es más simplificada en comparación a la UTRAN.
- Las soluciones para servicios de voz y datos en LTE son: CSFB, SR-VCC, *One Voice* y VOLGA.
- CSFB provee servicios de voz a la red LTE utilizando las redes 2G y 3G.
- En el CSFB no es necesaria la instalación de una red IMS.
- La solución SR-VCC otorga servicios de voz a la red LTE a través de una red IMS.
- SR-VCC ofrece una comunicación continua entre las redes 2G, 3G y 4G.
- *One Voice* implementa los servicios de voz y SMS en LTE utilizando una red IMS.
- VOLGA culminó en el año 2009.

V.5 Tecnologías competidoras

- CDMA2000 ofrece transferencia simultánea de voz y datos a través de SVDO.
- WiMAX *Mobile* no obtuvo el éxito esperado en el mercado.
- En Venezuela está implementado WiMAX desde el 2007.
- LTE-*Advanced* no es considerada como una competencia sino como la evolución de LTE.
- Los dispositivos del estándar LTE también son compatibles con la tecnología LTE-*Advanced*.

CONCLUSIONES

LTE surge como la evolución de la telefonía móvil que da paso a mayores velocidades y calidad de servicio, guiándose sobre el *Release 8* para la interconexión y arquitectura. La migración de este estándar inalámbrico es sencilla en términos de infraestructura y brinda compatibilidad en el plano de campos de datos con las tecnologías predecesoras.

Para brindar solución de voz sobre conmutación de paquetes se prestan opciones según la situación de la Corporación DIGITEL, en donde CSFB se presenta como la implementación más sencilla para una red nueva que se despliega sobre tecnologías antiguas que se encuentran en gran desarrollo y en dominio de la red.

La frecuencia en donde se emplea una tecnología brinda aportes y cualidades a la red. La banda de 1800 MHz es superior a la banda de 2100 MHz en ventajas ofrecidas, teniendo en cuenta que se aprovecha la calidad de servicios que promete LTE para equilibrar las desventajas presentadas frente a la banda de 900 MHz. Por otro lado, la Corporación DIGITEL asigna la banda de 900 MHz a las tecnologías 2G/3G para obtener provecho de la eficiencia espectral en donde convergen los estándares que representan el fuerte de la empresa, ofreciendo una mayor cobertura en relación a la potencia deseada.

LTE en la Corporación DIGITEL más allá de ser un proyecto factible en proceso de implementación, cumple en casi su totalidad con los estatutos sentados por la 3GPP en temas de latencias, soporte, arquitectura, movilidad de la red, entre otros. De la misma manera se constituyen parámetros de calidad de servicios asociados a las necesidades presentes en los usuarios.

Siendo una nueva tecnología que se ha abierto paso en el mercado a velocidades increíbles, aún mayor a sus predecesoras, brinda los beneficios a las operadoras y usuarios necesarios para consagrarse como la tecnología de cuarta generación predilecta de telefonía móvil en el mundo. Por otra parte se introduce

LTE-*Advanced* donde más que una tecnología competidora, representa las puertas abiertas a la evolución de LTE brindando mejoras y manteniendo una compatibilidad absoluta con ella.

RECOMENDACIONES

- Teniendo como base la coexistencia entre GSM y LTE bajo la misma banda de frecuencia, siempre apuntando al aprovechamiento del espectro y evitando malgastar los recursos, se puede emplear una zona de buffer entre zonas rurales en donde se maneje la tecnología LTE y zonas donde no se requiera de la disponibilidad de ello.

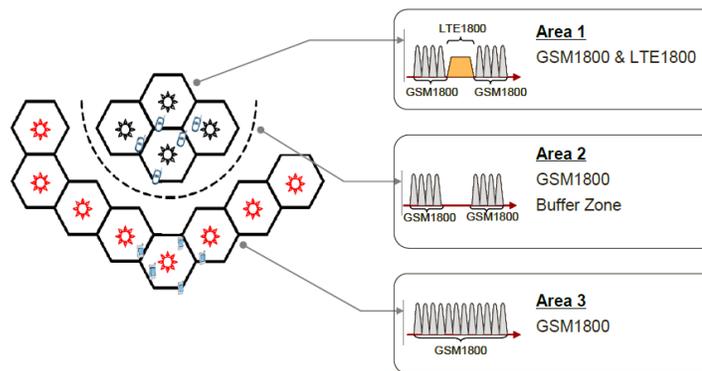


Figura 59. Zona de *buffer*. Fuente: LTE 1800MHz Ecosystem Drivers, Huawei.

- Actualizar en los informes los nombres de los enlaces y demás dispositivos según la información dada en el *Release 8* del 3GPP para evitar confusiones posteriores.
- Recomendaciones según la industria:
 - Limpiar el espectro antes de la integración con LTE
 - Estar a disponibilidad para reducir visita a los sitios.
 - Realizar los diseños de RF con datos de campo
 - Revisar y tener el transporte en óptimas condiciones.
 - Optimizar los parámetros de QoS para soportar una red LTE.

BIBLIOGRAFÍA

- 3G Americas. (2010). *GSM-UMTS Network Migration to LTE*.
- 3G Americas, Rysavy Research. (2009). *HSPA to LTE-Advanced: 3GPP Broadband Evolution to IMT-Advanced (4G)*.
- 4G Americas. (2011). *Coexistence of GSM, HSPA and LTE*.
- 4G Americas. (Enero de 2012). *4G Mobile Broadband Evolution: 3GPP Release 10 and Beyond*.
- Agusti Comes, F., Álvarez, F. B., Casadevall Palacio, F., Ferrú Ferre, R., Pérez Romero, J., & Sallent Roig, O. (2010). *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles*. Barcelona: Fundación Vodafone.
- AT&T, Orange, Telefonica, TeliaSonera, Verizon, Vodafone, Alcatel-Lucent, Ericsson, Nokia Siemens Networks, Nokia,. (2009). *One Voice; Voice over IMS profile*.
- Bluszcz, J. (2009). *CSFB and SMSoSGs*.
- Bolaños Guerrero, C. (2011). *Evolución de la arquitectura UMTS*.
- CONATEL. (2011 de Diciembre de 30). *CONATEL, Providencia Administrativa N° 1.879*. Recuperado el 2012 de Agosto de 20, de www.conatel.gob.ve
- CONATEL. (s.f.). *CONATEL*. Recuperado el 20 de Agosto de 2012, de www.conatel.gob.ve
- Dahlman, E., Parkvall, S., & Sköld, J. (2011). *4G LTE / LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Oxford: Elsevier.
- Dahlman, E., Parkvall, S., Sköld, J., & Beming, P. (2008). *3G Evolution HSPA and LTE for Mobile Broadband*. Oxford.

Ergen, M. (2009). *Mobile Broadband Including WiMAX and LTE*. New York: Springer.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2006). *Metodología de la Investigación*. México: McGraw-Hill.

Holma, H., & Antti, T. (2009). *LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*. Finlandia: John Wiley & Sons Ltd.

HUAWEI. (2011). *LTE 1800 MHz Ecosystem Drivers*. Huawei Technologies CO., LTD.

Hurtado Ati, C. G. (2011). *Estudio de factibilidad para la implementación de LTE en el Ecuador*. Quito.

Khan, F. (2009). *LTE for 4G Mobile Broadband*. New York: Cambridge.

LTE WORLD. (s.f.). Recuperado el 25 de Agosto de 2012, de www.lte-world.org

Lugo Ruíz, J. A. (2012). Sistemas de radio y telecomunicación. *Clasificación de Sistemas Móviles*. Caracas.

Lugo Ruíz, J. A. (2012). Sistemas de Radio y Telecomunicaciones. *Global System for Mobile Communication (GSM)*. Caracas.

Lugo Ruíz, J. A. (2012). Sistemas de Radio y Telecomunicaciones. *Técnicas de Acceso Múltiples*. Caracas.

Lugo Ruíz, J. A. (2012). Sistemas de Radio y Telecomunicación. *Sistemas Celulares*. Caracas.

Miñaro López, A. (s.f.). *LTE/SAE, una apuesta segura en la evolución de las redes móviles*.

Morotola. (2011). *UMTS/HSPA to LTE Migration*.

Nokia Siemens Networks. (2011). *Nokia Siemens Networks LTE 1800 MHz: Introducing LTE with Maximun Reuse of GSM assets*. Nokia Siemens .

Orozco G, N., Gonzalo, O., & Rubén, L. (2011). *Estudio de Factibilidad Para la Migración Del Sistema Móvil UMTS/HSPA a LTE*.

Pergamino Virtual. (21 de Enero de 2009). *Pergamino Virtual*. Recuperado el 15 de Abril de 2012, de <http://www.pergaminovirtual.com.ar/definicion/UDP.html>

Qualcomm. (2012). *Circuit-switched fallback. The first phase of voice evolution for mobile LTE devices*.

Sanz, M. (2008 de Noviembre de 24). *Rediris*. Recuperado el 15 de Abril de 2012, de www.rediris.es/rediris/boletin/28/enfoque1.pdf

SIERRA WIRELESS. (2011). *LTE1800: A Versatile Platform for Connected Devices and Application*. Sierra Wireless Inc.

Song, L., & Shen, J. (s.f.). *Evolved Cellular Network Planning and Optimization for UMTS and LTE*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.

Starnet Networks. (2011). *LTE Simplifying the Migration to 4G Networks*.

APÉNDICE A
REDES LTE ALREDEDOR DEL MUNDO

País	Operadora	Banda de Frecuencia	Fecha de lanzamiento
Noruega	Teliasonera/Netcom	Banda 7 (2600 MHz)	Dic - 2009
Suecia	TeliaSonera	Banda 20 (800 MHz)	Dic - 2009
Suecia	TeliaSonera	Banda 7 (2600 MHz)	Dic - 2009
Uzbekistán	MTS	Banda 13 (700 MHz)	Jul - 2010
Uzbekistán	MTS	Banda 7 (2600 MHz)	Jul - 2010
Uzbekistán	UCell/TeliaSonera	Banda 12, 13, 14 (700 MHz)	Ago - 2010
Uzbekistán	UCell/TeliaSonera	Banda 7 / 38 (2600 MHz)	Ago - 2010
Alemania	O2/Telefónica	Banda 7 (2600 MHz)	Sep - 2010
Polonia	CenterNet/Mobyland	Banda 3 (1800 MHz)	Sep - 2010
Austria	A1	Banda 7 (2600 MHz)	Oct - 2010
Finlandia	TeliaSonera	Banda 3 (1800 MHz)	Nov - 2010
Finlandia	Teliasonera	Banda 7 (2600 MHz)	Nov - 2010
Alemania	Vodafone	Banda 20 (800 MHz)	Nov - 2010
Hong Kong	CSL	Banda 3 (1800 MHz)	Nov - 2010
Hong Kong	CSL	Banda 7 (2600 MHz)	Nov - 2010
Suecia	Telenor/Tele2/Net4Mobility	Banda 7 (2600 MHz)	Nov - 2010
Suecia	Telenor/Tele2/Net4Mobility	Banda 8 (900 MHz)	Nov - 2010
Dinamarca	TeliaSonera	Banda 3 (1800 MHz)	Dic - 2010
Dinamarca	Teliasonera	Banda 7 (2600 MHz)	Dic - 2010
Estonia	EMT	Banda 3 (1800 MHz)	Dic - 2010
Estonia	EMT	Banda 7 (2600 MHz)	Dic - 2010
Finlandia	Elisa	Banda 3 (1800 MHz)	Dic - 2010
Finlandia	Elisa	Banda 7 (2600 MHz)	Dic - 2010
Japón	NTT DOCOMO	Banda 1 (2100 MHz)	Dic - 2010
Estados Unidos	Metro PCS	Banda 2 (1900 MHz)	Dic - 2010
Estados Unidos	Metro PCS	Banda 4 (2100/1700 MHz)	Dic - 2010
Estados Unidos	Verizon Wireless	Banda 13 (700 MHz)	Dic - 2010
Finlandia	DNA	Banda 3 (1800 MHz)	Ene - 2011
Finlandia	DNA	Banda 7 (2600 MHz)	Ene - 2011
Alemania	Telekom Deutschland	Banda 20 (800 MHz)	Abr - 2011

Estudio y caracterización de la integración e implementación del estándar LTE (*Long Term Evolution*)
a las redes existentes de la Corporación DIGITEL C.A.

País	Operadora	Banda de Frecuencia	Fecha de lanzamiento
Lituania	Teliasonera/Omnitel	Banda 3 (1800 MHz)	May - 2011
Lituania	Teliasonera/Omnitel	Banda 7 (2600 MHz)	May - 2011
Polonia	Aero2	Banda 38 (2600 MHz)	May - 2011
Bélgica	Proximus	Banda 3 (1800 MHz)	Jun - 2011
Austria	T-Mobile	Banda 7 (2600 MHz)	Jul - 2011
Canadá	Rogers Wireless	Banda 4 (2100/1700 MHz)	Jul - 2011
Canadá	Rogers Wireless	Banda 7 (2600 MHz)	Jul - 2011
Alemania	O2/Telefónica	Banda 20 (800 MHz)	Jul - 2011
Alemania	Telekom Deutschland	Banda 3 (1800 MHz)	Jul - 2011
Letonia	Teliasonera/LMT	Banda 3 (1800 MHz)	Jul - 2011
Corea del Sur	LG UPlus	Banda 5 (850 MHz)	Jul - 2011
Corea del Sur	SK Telecom	Banda 5 (850 MHz)	Jul - 2011
Australia	Telstra	Banda 3 (1800 MHz)	Ago - 2011
Estados Unidos	AT&T Mobility	Banda 17 (700 MHz)	Sep - 2011
Estados Unidos	AT&T Mobility	Banda 4 (2100/1700 MHz)	Sep - 2011
Dinamarca	TDC	Banda 7 (2600 MHz)	Oct - 2011
Austria	Hutchison 3	Banda 7 (2600 MHz)	Nov - 2011
Canadá	Bell	Banda 4 (2100/1700 MHz)	Nov - 2011
Canadá	Bell	Banda 7 (2600 MHz)	Nov - 2011
Puerto Rico	AT&T Mobility	Banda 17 (700 MHz)	Nov - 2011
Puerto Rico	AT&T Mobility	Banda 4 (2100/1700 MHz)	Nov - 2011
Suiza	Swisscom	Banda 7 (2600 MHz)	Nov - 2011
Armenia	K-Telecom/VivaCell-MTS	Banda 7 (2600 MHz)	Dic - 2011
Kirguistán	Saima-Telecom	Banda 7 / 38 (2600 MHz)	Dic - 2011
Rusia	Yota	Banda 7 (2600 MHz)	Dic - 2011
Singapur	Singapur Telecommunications/SingTel	Banda 3 (1800 MHz)	Dic - 2011
Singapur	Singapur Telecommunications/SingTel	Banda 7 (2600 MHz)	Dic - 2011
Estados Unidos	Cricket Wireless	Banda 4 (2100/1700 MHz)	Dic - 2011
Hungría	T-Mobile	Banda 3 (1800 MHz)	Ene - 2012
Corea del Sur	KT Corporation	Banda 3 (1800 MHz)	Ene - 2012
Brasil	SKY Brasil	Banda 7 / 38 (2600 MHz)	Feb - 2012

Estudio y caracterización de la integración e implementación del estándar LTE (*Long Term Evolution*)
a las redes existentes de la Corporación DIGITEL C.A.

País	Operadora	Banda de Frecuencia	Fecha de lanzamiento
Canadá	Telus	Banda 4 (2100/1700 MHz)	Feb - 2012
Emiratos Árabes Unidos	Etisalat	Banda 3 (1800 MHz)	Feb - 2012
Croacia	Vipnet	Banda 3 (1800 MHz)	Mar - 2012
Croacia	Vipnet	Banda 7 / 38 (2600 MHz)	Mar - 2012
Japón	EMOBILE	Banda 3 (1800 MHz)	Mar - 2012
Angola	Movicel	Banda 3 (1800 MHz)	Abr - 2012
Australia	Optus	Banda 3 (1800 MHz)	Abr - 2012
Croacia	T-Mobile	Banda 3 (1800 MHz)	Abr - 2012
Hong Kong	China Mobile Hong Kong	Banda 40 (2300 MHz)	Abr - 2012
Hong Kong	China Mobile Hong Kong	Banda 7 (2600 MHz)	Abr - 2012
India	Airtel	Banda 40 (2300 MHz)	Abr - 2012
Hong Kong	3 HK	Banda 40 (2300 MHz)	May - 2012
Hong Kong	Hutchison 3	Banda 3 (1800 MHz)	May - 2012
Hong Kong	Hutchison 3	Banda 7 (2600 MHz)	May - 2012
Hong Kong	PCCW	Banda 7 (2600 MHz)	May - 2012
Namibia	MTC Namibia	Banda 3 (1800 MHz)	May - 2012
Rusia	Megafon	Bandas 7, 38 (2600 MHz)	May - 2012
Colombia	UNE-EPM Telecommunications	Banda 7 / 38 (2600 MHz)	Jun - 2012
República Checa	O2/Telefónica	Banda 3 (1800 MHz)	Jun - 2012
Emiratos Árabes Unidos	du	Banda 3 (1800 MHz)	Jun - 2012
Hungría	Telenor	Banda 3 (1800 MHz)	Jul - 2012
Eslovenia	Si.mobil	Banda 3 (1800 MHz)	Jul - 2012
Estados Unidos	Sprint Nextel	Banda 25 (1900 MHz)	Jul - 2012
Filipinas	Smart Communications	Banda 1 (2100 MHz)	Ago - 2012
Filipinas	Smart Communications	Banda 3 (1800 MHz)	Ago - 2012
Eslovaquia	Telefónica_Europe	Banda 3 (1800 MHz)	Ago - 2012
Hong Kong	Smartone	Banda 3 (1800 MHz)	Sep - 2012
Japón	au	Banda 1 (2100 MHz)	Sep - 2012
Japón	SoftBank Mobile	Banda 1 (2100 MHz)	Sep - 2012
Rusia	MTS	Banda 38 (2600 MHz)	Sep - 2012
Arabia Saudita	Saudi Telecom Company (STC)	Banda 40 (2300 MHz)	Sep - 2012

País	Operadora	Banda de Frecuencia	Fecha de lanzamiento
Arabia Saudita	Zain	Banda 3 (1800 MHz)	Sep - 2012
Singapur	M1	Banda 3 (1800 MHz)	Sep - 2012
Singapur	M1	Banda 7 (2600 MHz)	Sep - 2012
Singapur	StarHub	Banda 3 (1800 MHz)	Sep - 2012
Singapur	StarHub	Banda 7 (2600 MHz)	Sep - 2012
Colombia	Claro Americas	Banda 7 (2600 MHz)	Abr - 2013
Brasil	Vivo (Telecommunications)	Banda 7 (2600 MHz)	2013
Italia	Tre - Tim - Vodafone	Banda 3 (1800 MHz)	2013

Tabla 17. Redes LTE alrededor del mundo. Fuente: Propia.

ANEXO A
LISTA DE ACRÓNIMOS

1xEV-DO	<i>One Carrier-Evolved Data-Optimized</i>
1xRTT	<i>One Carrier Radio Transmission Technology</i>
3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>
AF	<i>Applications Function</i>
AMBR	<i>Aggregate Maximum Bit Rate</i>
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
ARQ	<i>Automatic Repeat ReQuest</i>
AS	<i>Access Stratum</i>
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
BBU	<i>Baseband Unit</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CN	<i>Core Network</i>
CSFB	<i>Circuit Switched Fallback</i>
DL	<i>Downlink</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EDGE	<i>Enhanced GPRS</i>
eNB	<i>Evolved NodeB</i>
EoSDH	<i>Ethernet Over SDH</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
ePDG	<i>Evolved Packet Data Gateway</i>
EPS	<i>Evolved Packet System</i>
E-UTRA	<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access</i>
E-UTRAN	<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplexing</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
GANC	<i>Generic Access Network Controller</i>

GBR	<i>Guarantee Bit Rate</i>
GGSN	<i>Gateway GPRS Support Node</i>
GMSK	<i>Gaussian Minimum Shift Keying</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile communications</i>
GTP-U	<i>GPRS Tunneling Protocol – User Plane</i>
HARQ	<i>Hybrid ARQ,</i>
HLR	<i>Home Location Register</i>
HSCSD	<i>High-Speed Circuit Switched Data</i>
HSDPA	<i>High-Speed Downlink Packet Access</i>
HSPA	<i>High-Speed Packet Access</i>
HSS	<i>Home Subscriber Server</i>
HSUPA	<i>High-Speed Uplink Packet Access</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IMS	<i>IP Multimedia Subsystem</i>
IMSI	<i>International Mobile Subscriber Identity</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
KPI	<i>Key Performance Indicators</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MISO	<i>Multiple Input Single Output</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
MMS	<i>Multimedia Messaging System</i>
MPLS	<i>Multi-Protocol Label Switching</i>
MTTF	<i>Mean Time To Failure</i>
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i>
MU-MIMO	<i>Multi User MIMO</i>
NAS	<i>Non-Access Stratum</i>
NGBR	<i>Non-GBR</i>

NMT	<i>Nordic Mobile Telephone</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
OTA	<i>Over The Air</i>
PCRF	<i>Policy and Charging Rules Function</i>
PDC	<i>Personal Digital Communications</i>
PDCP	<i>Packet Data Convergence Protocol</i>
PDH	<i>Plesiochronous Digital Hierarchy</i>
PDN	<i>Packet Data Network</i>
PDU	<i>Power Distribution Unit</i>
P-GW	<i>PDN Gateway</i>
PLMN	<i>Public Land Mobile Network</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RLC	<i>Radio Link Control</i>
RNC	<i>Radio Network Controller.</i>
RNL	<i>Radio Network Layer</i>
RRC	<i>Radio Resource Control</i>
RRU	<i>Remote Radio Unit</i>
RSRP	<i>Reference Signal Received Power</i>
SAE	<i>System Architecture Evolution</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
SCTP	<i>Stream Control Transmission Protocol</i>
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
SDU	<i>Service Data Unit</i>
SGSN	<i>Serving GPRS Support Node</i>
S-GW	<i>Serving Gateway</i>
SIMO	<i>Single Input Multiple Output</i>
SIP	<i>Session Initiation Protocol</i>
SISO	<i>Single Input Single Output</i>

SMS	<i>Short Message Service</i>
SR-VCC	<i>Single Radio Voice Call Continuity</i>
STP	<i>Signaling Transfer Point</i>
SU-MIMO	<i>Single User MIMO</i>
SVLTE	<i>Simultaneous Voice and LTE</i>
TACS	<i>Total Access Communications System</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDD	<i>Time Division Duplexing</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TFT	<i>Traffic Flow Templates</i>
TNR	<i>Transport Network Layer</i>
TX	<i>Transmit</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UL	<i>Uplink</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
USIM	<i>Universal Subscriber Identity Module</i>
VoIP	<i>Voice over IP</i>
VOLGA	<i>Voice Over LTE via Generic Access</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>

ANEXO B

TABLA COMPARATIVA DE LTE Y WiMAX

Feature	LTE	WiMAX Release 1.0	WiMAX Release 1.5	Impact
Multiple Access	OFDM in downlink, Discrete Fourier Transform (DFT)-spread OFDM in uplink	OFDM in downlink and uplink	OFDM in downlink and uplink	DFT-spread OFDM reduces the peak-to-average power ratio and reduces terminal complexity, requires one-tap equalizer in base station receiver.
Uplink Power Control	Fractional path-loss compensation	Full path-loss compensation	Full path-loss compensation	Fractional path-loss compensation enables flexible tradeoff between average and cell-edge data rates.
Scheduling	Channel dependent in time and frequency domains	Channel dependent in time domain	Channel dependent in time and frequency domains	Access to the frequency domain yields larger scheduling gains.
MIMO Scheme	Multi-codeword (horizontal), closed loop with pre-coding	Single codeword (vertical)	Single codeword (vertical), with rank-adaptive MIMO (TDD) and with closed-loop pre-coding (FDD)	Horizontal encoding enables per-stream link adaptation and successive interference cancellation receivers.
Modulation and Coding Scheme Granularity	Fine granularity (1-2 dB apart)	Coarse granularity (2-3 dB apart)	Coarse granularity (2-3 dB apart)	Finer granularity enables better link adaptation precision.
Hybrid Automatic Repeat Request (ARQ)	Incremental redundancy	Chase combining	Chase combining	Incremental redundancy is more efficient (lower SNR required for given error rate).
Frame Duration	1 msec subframes	5 msec subframes	5 msec subframes	Shorter subframes yield lower user plane delay and reduced channel quality feedback delays.
Overhead / Control Channel Efficiency	Relatively low overhead	Relatively high overhead	Relatively high overhead apart from reduction in pilots	Lower overhead improves performance.

Tabla 18. Características de las tecnologías LTE y WiMAX. Fuente: Mobile Broadband Explosion, 4G Americas.