



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Diseño de una red de nueva generación LTE-A para una zona urbana en Bogotá bajo el estándar 3gpp y la recomendación ITU-R M.1457

Jimmy Alexander Nuñez Coral

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Sistemas e Industrial
Bogotá, 2013

Diseño de una red de nueva generación LTE-A para una zona urbana en Bogotá bajo el estándar 3gpp y la recomendación ITU-R M.1457

Jimmy Alexander Nuñez Coral

Tesis presentada para optar al título de Magíster en Ingeniería – Telecomunicaciones

Directora:

PhD. (c) Zoila Inés Ramos Rodríguez

Redes Móviles de Nueva Generación

Grupo de Investigación de Teleinformática de la Universidad Nacional de Colombia GITUN

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Sistemas e Industrial
Bogotá, 2013

A mis padres por inculcarme a cada momento el amor por la investigación, el descubrir cada día que no se termina de aprender, Gracias al apoyo de mi Novia Marcela Tamayo por su amor.

Jimmy Alexander Nuñez Coral

Agradecimientos

Este trabajo se realizó como parte del proyecto de tesis de Maestría en Ingeniería – Telecomunicaciones: “*Diseño de una red de nueva generación LTE-A para una zona urbana en Bogotá bajo el estándar 3gpp y la recomendación ITU-R M.1457*”, en desarrollo como parte del Grupo de Investigación en Teleinformática de la Universidad Nacional de Colombia – GITUN y la entera colaboración de mi directora de tesis Zoila Inés Ramos Rodríguez Ph.D (c) en Ingeniería de Telecomunicaciones, Especialista Radiocomunicaciones, Especialista en Derecho de las Telecomunicaciones, Ingeniera Electrónica, con estudios en Dirección de Empresas, estudiante de Derecho. Autora y coautora de varios libros y artículos, Docente Investigadora Universidad Nacional de Colombia, Perito avalada por la Comisión de Regulación de Comunicaciones de Colombia – CRC, Consultora.

Resumen

La industria de las telecomunicaciones, a nivel mundial y vista desde la perspectiva sus principales actores, operadores, fabricantes y distribuidores, atraviesa por una serie de cambios relacionados con el despliegue de la banda ancha inalámbrica y la entrada del All IP y muchos servicios embebidos tras estos desarrollos tecnológicos. Estos cambios implican desafíos y aplican a cualquier mercado, donde esté establecido un operador móvil o un prestador de servicios móvil. Siendo el reto más importante migrar sus redes basadas en circuitos conmutados a redes All IP, el uso masificado de terminales móviles cada vez más sofisticadas y robustas hacen que el usuario demande más servicios. Por ende la implantación de la tecnología LTE hace que cubra todas las expectativas de velocidad tanto para los usuarios como para los operadores móviles.

Palabras clave: Long Term Evolution (LTE); Long Term Evolution Advanced (LTE-A); Redes Móviles; 3rd Generation Partnership Project (3GPP); Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA); Time Division Duplex (TDD).

Abstract

The telecommunications industry, global perspective and view its key players, operators, manufacturers and distributors, passes through a series of changes related to the deployment of wireless broadband and All-IP input and many services embedded after these technological developments. These changes involve challenges and apply to any market, which is set to a mobile operator or mobile service provider. Being the biggest challenge to migrate their networks based on circuit switched networks to All-IP, the mass use of mobile terminals become more sophisticated and robust make the user demand more services. Thus the introduction of LTE technology covering all makes speed expectations for both users and mobile operators.

Keywords: Long Term Evolution (LTE); Long Term Evolution Advanced (LTE-A); Redes Móviles; 3rd Generation Partnership Project (3GPP); Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA); Time Division Duplex (TDD).

Tabla de Contenido

Resumen.....	V
Abstract.....	VI
Introducción	1
1 Generalidades hacia la tecnología LTE	3
1.1. Especificaciones técnicas de LTE	6
1.2. Arquitectura genérica de los sistemas 3GPP.....	10
1.3. Red de acceso evolucionado E-UTRAN	11
1.4. Entidades de red e interfaces.....	12
1.5. Protocolos	13
1.5.1. Protocolos en la interfaz de radio.....	13
1.5.2. Protocolos de las interfaces S1 y X2	14
1.6. Comparación E-UTRAN y UTRAN.....	15
1.7. Requerimientos fundamentales de una red LTE-A.....	16
1.8. Tecnologías propias de LTE	17
1.8.1. Acceso Múltiple por división de frecuencia ortogonal OFDMA	17
1.1.1 Acceso Múltiple por división de frecuencia ortogonal de portador simple SC-FDMA20	
1.8.2. Evolución a la tecnología 4G.....	23
1.9. Red troncal de paquetes evolucionada EPC.....	24
1.9.1. Equipo de usuario EU	25
1.9.2. Gestión de Sesiones	27
1.9.3. Gestión de movilidad	37
1.9.4. Marco general de seguridad.....	41
1.2. OFDMA como técnica de acceso múltiple para el enlace descendente	46
1.2.1. Sistemas celulares OFDMA.....	47
1.2.2. Parámetros de OFDMA empleados por LTE	48
1.3. FDMA como técnica de acceso múltiple para el enlace ascendente.....	49
1.3.1. Esquemas de transmisión y recepción SC-FDMA	50

1.3.2.	Parámetros de SC-FDMA empleados por LTE.....	52
1.4.	Estructuras con varias antenas.....	52
1.4.1.	Formulación de las Estructuras MIMO.....	55
1.4.2.	Capacidad de las Estructuras MIMO	56
1.4.3.	Precodificación	58
1.4.4.	MIMO multiusuario (MU MIMO).....	59
1.4.5.	Comparativa entre estructuras MIMO y MU MIMO.....	61
1.5.	Recomendación ITU-R M.1457.....	61
2	Parametrización y análisis de la Red LTE-A a simular.....	65
2.1.	Estudio de Perfil de la localidad de Teusaquillo Bogotá D.C.....	66
2.2.	Modelo de propagación a implementar en la simulación de la localidad de Teusaquillo Bogotá D.C.....	71
2.3.	Estudio de Cobertura de la localidad de Teusaquillo Bogotá D.C	72
2.4.	Estudio de Cobertura Multitransmisor de la localidad de Teusaquillo Bogotá D.C	77
2.5.	Trafico de ruido de la señal (SNIR)	78
3	Evaluación del Desempeño la Red LTE-A Simulada	79
3.1.	Evaluación de estudio de perfil.	79
3.2.	Evaluación estudio de cobertura.....	81
3.3.	Evaluación estudio multitransmisor.	83
4.	Comparativa de tecnologías sobre operadores de servicios de telefonía móvil 3G y redes LTE-A 4G.....	89
5.	Impacto ambiental generado bajo tecnologías emergentes NGN LTE-A para operadores móviles.....	93
6.	Conclusiones y Recomendaciones	97
6.1.	Conclusiones	97
6.2.	Recomendaciones y trabajos futuros	98
Anexo A: Especificaciones Modem ZTE USB		99
Anexo B: Estadísticas Estación Base BOG Contraloría GSM.....		101
Bibliografía.....		111

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1-1. Panorámica de sistemas móviles celulares 3G/4G	5
Figura 1-2. Paradigma de la evolución del mercado de comunicaciones móviles.	5
Figura 1-3. Relación del costo de la red con el volumen de tráfico.	6
Figura 1-4. Arquitectura genérica de un sistema celular	8
Figura 1-5. Escenarios de suministro de servicios de comunicación en redes celulares.	8
Figura 1-6. Escenarios de suministro de servicios de comunicación en redes celulares y otras redes.	9
Figura 1-7. Arquitectura de alto nivel de los sistemas 3GPP (GSM, UMTS y LTE) ⁴	9
Figura 1-8. Red de acceso E-UTRAN.....	11
Figura 1-9. Protocolos de la interfaz de radio E-UTRAN.	13
Figura 1-10. Protocolos en las interfaces S1 (izquierda) y X2 (derecha)	15
Figura 1-11. Comparativa de la arquitectura de red de E-UTRAN y UTRAN ⁸	16
Figura 1-12. (a).Transmisión de banda ancha con única portadora, (b).Transmisión una frecuencia selectiva de canal OFDM ⁹	18
Figura 1-13. Canal de codificación en combinación con el dominio de frecuencia intercalado para proporcionar diversidad de frecuencia en el caso de transmisión OFDM ⁹	18
Figura 1-14. OFDM como un esquema usuario-multiplexado/múltiple-acceso: (a) de enlace descendente, (b) de enlace ascendente ¹⁰	19
Figura 1-15. Multiplicación de usuario distribuida ¹¹	20
Figura 1-16. Enlace ascendente de transmisión y control de tiempo ¹¹	20
Figura 1-17. SC-FDMA el dominio del tiempo de transmisión de procesamiento ¹²	21
Figura 1-18. Transmisión distribuida con igualdad de separación entre sub-portadoras ocupadas ¹²	21
Figura 1-19. SC-FDMA dominio de la frecuencia de transmisión de procesamiento (DFT-S-OFDM) muestra la distribución del mapeo en sub-portadoras localizadas ¹²	22
Figura 1-20. Arquitectura básica de la red troncal EPC ⁸	24
Figura 1-21. Equipo de Usuario (User Equipment, UE)	25
Figura 1-22. Servicio de conectividad IP de la red LTE: (conexión PDN).....	28
Figura 1-23. Conexiones PDN y servicios portadores EPS.....	29
Figura 1-24. Parámetros de QoS en el sistema LTE	33
Figura 1-25. Relación entre los conceptos IP-CAN y flujos SDF utilizados en el subsistema PCC con los componentes del servicio de conectividad IP de la red LTE.	36
Figura 1-26. Modelo de estados para la gestión de movilidad y de la conexión a EPC	38
Figura 1-27. Componentes de la seguridad de acceso a la red	42
Figura 1-28. Vector de autenticación en LTE.....	43
Figura 1-29. Jerarquía de claves de seguridad	44

Figura 1-30. Formato de un paquete IPsec ESP en modo túnel	45
Figura 1-31. Arquitectura de la solución NDS/IP	46
Figura 1-32. Multiplexación de usuarios en OFDMA	46
Figura 1-33. Ejemplo de asignación de sub-portadoras a células según un factor de reuso $F=3$	48
Figura 1-34. Ejemplo de la evolución temporal de un símbolo OFDM compuesto por 3, 6 y 12 Sub-portadoras, moduladas por una secuencia de símbolos alternados +1, -1.	49
Figura 1-35. Ejemplo del PAPR para un símbolo OFDM compuesto por 3, 6 y 12 sub-portadoras, moduladas por una secuencia de símbolos alternados +1, -1.	50
Figura 1-36. Esquema de transmisión de la señal SC-FDMA.....	51
Figura 1-37. Esquema de transmisión SC-FDMA distribuido.....	51
Figura 1-38. Esquema de Diversidad en Espacio.	52
Figura 1-39. E_b/N_0 versus R/B para diferentes valores de (a) L en el caso de MIMO y (b) M en el caso de diversidad.	55
Figura 1-40. Descomposición SVD.	57
Figura 1-41. Estructura MIMO con Pre-codificación.....	58
Figura 1-42. Esquema MIMO Multiusuario.....	59
Figura 1-43. Estructura MU MIMO en enlace descendente.....	60
Figura 2-1. Cartografía del estudio optica.....	65
Figura 2-2. Área cartografía ciudad de Bogotá D.C localidad Teusaquillo.....	66
Figura 2-3. Coordenadas geográficas de los sectores.....	66
Figura 2-4. Parámetros LTE del sector.....	67
Figura 2-5. Reutilización de factor 1 (Frequency Reuse of 1, FR1) ³⁵	68
Figura 2-6. Reutilización de factor 3 (Frequency Reuse of 3, FR3).....	68
Figura 2-7. Reutilización parcial de frecuencias (Partial Frequency Reuse, PFR) ³⁵	68
Figura 2-8. Reutilización soft de frecuencias (Soft Frequency Reuse, SFR) ³⁵	68
Figura 2-9. Propiedades del terminal UE.....	70
Figura 2-10. Propiedades de perfil.....	71
Figura 2-11. Propiedades del método de cálculo.....	72
Figura 2-12. Estudio de cobertura.....	72
Figura 2-13. Propiedades de emplazamiento de sector.....	73
Figura 2-14. Parámetros de radio del sector.....	73
Figura 2-15. Parámetros LTE específicos de sector.....	74
Figura 2-16. Cálculos de sensibilidad SNIR.....	74
Figura 2-17. Selección de cartografía del estudio y método de cálculo.....	75
Figura 2-18. Sectorización del transmisor.....	75
Figura 2-19. Configuración de los rangos de señal.....	76
Figura 2-20. Configuración del área de cálculo.....	76
Figura 2-21. Coordenadas cartográficas de los sectores.....	76
Figura 2-22. Descripción geográfica simulación.....	77
Figura 2-23. Propiedades de cobertura multitrasmisor.....	77

Figura 2-24. Coordenadas de cálculo multitrasmisor.	78
Figura 2-25. Área de cálculo multitrasmisor.	78
Figura 3-1. Inclinación de la antena.	79
Figura 3-2. (a) Cálculo de estudio de perfil (b) Acciones de configuración.	80
Figura 3-3. Tarea de cálculo estudio perfil.	80
Figura 3-4. Resultado cálculo estudio perfil.	80
Figura 3-5. Ajustes de área calculados.	81
Figura 3-6. Area de cobertura.....	81
Figura 3-7. Valor de cobertura en un punto.	82
Figura 3-8. Distancia y Azimut.	82
Figura 3-9. Coberturas de estudio Multitrasmisor.	83
Figura 3-10. Entorno terminales UE.....	83
Figura 3-11. Configuración terminales UE.....	84
Figura 3-12. Curva eficiencia espectral terminales UE.....	84
Figura 3-13. 3G/4G Antena 2dBi Omni.	85
Figura 3-14. Area de cálculo Multitrasmisor.	85
Figura 3-15. Parámetros LTE Multitrasmisor.....	86
Figura 3-16. Parámetros de interferencia Multitrasmisor.	86
Figura 3-17. Parámetros de interferencia Multitrasmisor.	87
Figura 3-18. Parámetros de cálculo de estudio Multitrasmisor.	87
Figura 3-19. Area de cálculo de estudio Multitrasmisor.	88
Figura 4-1. Red convergente LTE a HSPA+.	89
Figura 4-2. Cobertura 2G y 3G operadores de telefonía en Teusaquillo Bogotá D.C.	90
Figura 4-3. Estaciones Tx, Rx 2G y 3G operadores de telefonía en Teusaquillo Bogotá D.C.....	91
Figura 4-4. Test LTE-A UNE. EMP Telecomunicaciones S.A E.S.P. Hora 6:00 AM.	92
Figura 4-5. Test LTE-A UNE. EMP Telecomunicaciones S.A E.S.P. Hora 1:45 PM.	92
Figura 5-1. Abonados servicio móvil celular en el mundo y por nivel de desarrollo 2001-2011 ITU ³⁴	93
Figura 5-2. Diseño conceptual de una estación base BTS.	94
Figura 5-3. Conversión entre factores de energía y CO ₂	94

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1-1. Requisitos de las IMT-Avanzadas y la capacidad prevista LTE- Advanced	3
Tabla 1-2. Requisitos de rendimiento de LTE.	4
Tabla 1-3. Entidades de red e interfaces E-UTRAN.....	12
Tabla 1-4. LTE y UMB cumplen con los requisitos de IMT-2000 y por lo tanto ellos también son parte de la familia de normas IMT-2000 ¹³	23
Tabla 1-5. Parámetros de la capa física del terminal	27
Tabla 1-6. Valores de QCI estandarizados.....	34

Introducción

Siguiendo las tendencias tecnológicas en el ámbito de las comunicaciones de telefonía móvil, Al igual que GPRS, la tecnología 3G (*tecnología inalámbrica de tercera generación*) es un servicio de comunicaciones inalámbricas que le permite estar conectado permanentemente a Internet a través del teléfono móvil, el ordenador de bolsillo, el Tablet PC o el ordenador portátil. La tecnología 3G promete una mejor calidad y fiabilidad, una mayor velocidad de transmisión de datos y un ancho de banda superior (*que incluye la posibilidad de ejecutar aplicaciones multimedia*). Con velocidades de datos de hasta 384 Kbps, es casi siete veces más rápida que una conexión telefónica estándar. Lo que permite que podamos tener video llamadas.

Mirando hacia el futuro en que las redes tenderán a expandirse, se observa que las actuales redes móviles de tercera generación en Colombia se basan en la norma UMTS. Sin embargo, estas redes aún tienen algunas limitaciones:

- Soporte insuficiente para los servicios del dominio de paquetes (*Packet Switched*). Los servicios de voz, por su parte, son administrados por el dominio de circuitos (*Circuit Switched*) lo que hace que la operación de los dominios PS y CS sea realizado en diferentes redes. Esto incrementa el costo de Operación y Mantenimiento.
- Baja eficiencia en las rutas de transmisión de los datos.
- Incapacidad de soportar múltiples sistemas de radio acceso.

Siendo un déficit que tienen los operadores de telefonía móvil actualmente en nuestro país ya que sus redes se basan en conmutación de circuitos impidiendo el escalamiento a servicios que permitan tráfico de datos a altas velocidad estas experiencias ofrecidas en continentes como América del norte, Europa y Asia que ya han implementado en su medida la operación bajo redes All IP Usando tecnologías que permiten tener una experiencia de comunicación, navegación a altas velocidades.

El diseño de terminales móviles como Smartphone, pda's y Tablet's ha obligado a que se cree un mercado competitivo a nivel de hardware, software y una serie de servicios los cuales se han venido desarrollando con la incursión de tecnologías de comunicación las cuales han permitido en su medida

el uso masificado de redes de alta velocidad basadas en All IP a la par de unas políticas del buen uso del espectro radioeléctrico que permitieran una conectividad con el mundo en nuestro diario vivir.

El objetivo que se busca en una red LTE es mantener la competitividad de las redes futuras, hay entra el 3GPP abordando la investigación sobre la evolución de la tecnología 3G. En la que se permita que los operadores UMTS empleen más espectro (*hasta 20 Mhz.*) y mejores velocidades de transferencia de datos. Es ahí donde entra la llamada E3G o redes de 4^{ta} Generación la cual hace referente a las mejoras a realizar en el sistema 3G con las siguientes características:

- La tecnología de la interfaz de aire en E3G es llamada LTE o EPS (*Enhanced Packet System*).
- El programa para la evolución del core de la red se denomina SAE (*System Architecture Evolution*), también conocida como Evolved PacketCore (*EPC*).

La arquitectura de LTE llamada SAE tiene como objetivo permitir la migración de los sistemas 3GPP como UMTS/HSPA a velocidades mayores, siendo un campo prometedor e interesante desde el punto de vista tecnológico y comercial para un estudio, diseño e implementación de esta arquitectura de red ya que para que un país como Colombia tenga un desarrollo creciente se necesita transferencia tecnológica en telecomunicaciones como uno de los frentes con más proyección.

Esta investigación está dividida en 6 capítulos, en el capítulo 1 se describe las generalidades técnicas, diseño y de la tecnología LTE y LTE-A con un marco de especificaciones y recomendaciones por parte de la ITU, 3GPP. En el capítulo 2 se describe el software, parámetros, modelo de propagación, cartografía y parámetros necesarios para realizar la simulación de la tecnología LTE-A. En el capítulo 3 se describe la evaluación obtenida en la simulación realizada con el software y configuraciones estipuladas anteriormente. En el capítulo 4 se realiza una comparación de tecnologías con operadores de servicios de telefonía móviles actuales de la región. En el capítulo 5 se realiza un análisis del impacto ambiental resultante por el uso de estas nuevas tecnologías convergentes de servicios o mejor llamadas NGN. En el capítulo 6, como parte final de la investigación se describe unas conclusiones y recomendaciones referentes posibles estudios con base a los beneficios que se obtiene al realizar una transferencia tecnológica como motor de desarrollo en Colombia.

1 Generalidades hacia la tecnología LTE

La evolución de las redes de nueva generación en ambientes urbanos hacen más viable la implementación de redes LTE, gracias a la migración de redes HSDPA (*High Down load Speed Packet Access*) a LTE, dando soporte a las necesidades actuales de los usuarios de convergencia de servicios y tiempos de descarga más altas, manejando anchos de banda de 180KHz durante un 1ms, logrando calidad de servicio y la experiencia del usuario como medio de ayuda a la mejora de las condiciones de la red para mejorar el QoS, con el uso de Controladores de la red de Radio [1].

En preparación para la próxima generación de tecnología inalámbrica, denominada IMT-Avanzadas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), LTE-Advanced fue estandarizado por 3GPP en la versión 10 y versión 11. En noviembre de 2010, la UIT ratificó LTE-Advanced como IMT-Avanzadas. LTE-Advanced es una evolución de LTE, una tecnología basada en OFDMA, se especifica en la versión 8 y 9, que es apoyado por un ecosistema enorme de los fabricantes y operadores en todo el mundo, y ya ha demostrado ser la tecnología global de próxima generación [1].

Se espera que LTE-Advanced primero esté disponible comercialmente en 2012, con amplios despliegues para el año 2015. LTE-Advanced será a la vez hacia atrás y hacia delante compatible con LTE, es decir, los dispositivos LTE funcionará en las nuevas redes LTE-Advanced, y LTE-Advanced dispositivos operarán en mayores redes LTE¹.

3GPP es el desarrollo de las siguientes capacidades de LTE-Advanced:

- Ancho de banda más amplio apoyo para un máximo de 100 MHz a través de la agregación de bloques de 20 MHz.
- Enlace ascendente con antenas MIMO (*dos antenas de transmisión en el dispositivo*).
- Enlace descendente MIMO de hasta 8 por 8.
- Coordinado de transmisión multipunto (*CoMP*), con dos enfoques propuestos: Programación coordinada y / o formación estructurada, y conjuntos de procesamiento/transmisión.

La siguiente tabla resume y prevé a LTE-Advanced como resultados con respecto a los requisitos de IMT-Advanced:

Tabla 1-1. Requisitos de las IMT-Avanzadas y la capacidad prevista LTE- Advanced

Item	IMT-Advanced Requirement	LTE-Advanced Projected Capability
Peak Data Rate Downlink		1 Gbps
Peak Data Rate Uplink		500 Mbps
Spectrum Allocation	Up to 40 MHz	Up to 100 MHz
Latency User Plane	10 msec	10 msec
Latency Control Plane	100 msec	50 msec
Peak Spectral Efficiency DL ¹³³	15 bps/Hz	30 bps/Hz
Peak Spectral Efficiency UL	6.75 bps/Hz	15 bps/Hz
Average Spectral Efficiency DL	2.2 bps/Hz	2.6 bps/Hz
Average Spectral Efficiency UL	1.4 bps/Hz	2.0 bps/Hz
Cell-Edge Spectral Efficiency DL	0.06 bps/Hz	0.09 bps/Hz
Cell-Edge Spectral Efficiency UL	0.03 bps/Hz	0.07 bps/Hz

¹ Tomado de: <http://www.4gamericas.org/index.cfm?fuseaction=page§ionid=352>

Una de las metas de desempeño para LTE es el E-UTRA se espera para soportar diferentes tipos de servicios, incluyendo la navegación web, FTP, videos streaming, VoIP, juegos en línea y en tiempo real, push-to-talk y push-to-View. Por lo tanto, LTE es diseñada para ser una tecnología de alta velocidad de datos y un sistema de baja latencia como se indica por la clave de criterios de rendimiento que se muestra en la Tabla 1-2. La capacidad de ancho de banda de un UE se espera que sea 20MHz tanto para la transmisión y la recepción. El proveedor de servicios puede implementar sin embargo las células con cualquiera de los anchos de banda que se enumeran en la Tabla 1-2. Esto le da flexibilidad a los proveedores de servicios para adaptar su oferta depende de la cantidad de espectro disponible o la capacidad de comenzar con un espectro limitado de baja por adelantado costes y el crecimiento del espectro para obtener capacidad adicional. Más allá de la LTE métricas también está dirigida a minimizar el consumo de los costos y el poder garantizando al mismo tiempo compatibilidad con versiones anteriores y una migración rentable de los sistemas UMTS².

Mejora de multidifusión servicios, soporte mejorado para la calidad de extremo a extremo de servicio (QoS) y la minimización del número de opciones y funciones redundantes en la arquitectura también se han dirigido. La eficiencia espectral en el enlace descendente LTE (DL) será de 3 a 4 veces mayor que la versión 6 de HSDPA mientras que en el enlace ascendente (UL), será de 2 a 3 veces mayor que la de la Versión 6 HSUPA. El procedimiento de entrega dentro de LTE se destina a minimizar el tiempo de interrupción a menos que la conmutación de circuitos traspasos en las redes 2G. Además las entregas a los sistemas de 2G/3G LTE están diseñados para ser sin problemas [1].

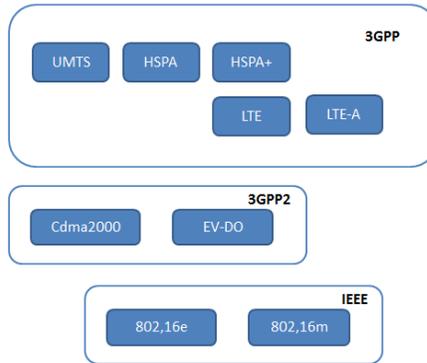
Tabla 1-2. Requisitos de rendimiento de LTE.

Metric	Requirement
Peak Data Rate	DL: 100Mbps UL: 50Mbps (for 20Mhz spectrum)
Mobility support	Up to 500 Kmph but optimized for low speeds from 0 to 15Kmph
Control plane latency (Transition time to active state)	< 100ms (for idle to active)
User plane latency	< 5 ms
Control plane capacity	> 200 users per cell (for 5Mhz spectrum)
Coverage (cell size)	5-100km with slight degradation after 30km
Spectrum flexibility	1.25, 2.5, 5, 10 15, and 20Mhz

A nivel global, la principal competencia de UMTS es cdma2000, emanado del 3GPP2, tal y como se muestra en la Figura 1-1. La clara necesidad de altas velocidades de transmisión de datos como condición necesaria para el eventual despegue de estos servicios, encuentra respuesta en la tecnología HSPA, y equivalentemente EV-DO en el contexto 3GPP2, elementos facilitadores del crecimiento exponencial del tráfico de datos observado desde 2007, junto con la generalización de las tarifas planas para el acceso a Internet móvil. El camino apuntado por el 3GPP para cubrir las necesidades tecnológicas en el horizonte 2010-2020 tiene a LTE como máximo exponente. La predominancia de LTE supone el fin del camino paralelo del 3GPP2, que abandona el desarrollo de UMB, equivalente a LTE. El contrapunto competitivo para LTE intenta impulsarse desde IEEE con WiMAX 802.16e y

posteriormente 802.16m, como solución propiamente IMT-Advanced (sistema 4G), al igual que la propuesta LTE-Advanced por parte del 3GPP².

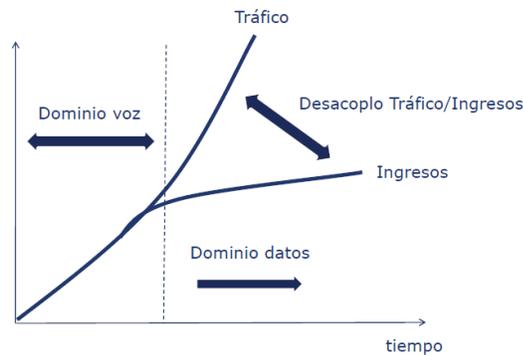
Figura 1-1. Panorámica de sistemas móviles celulares 3G/4G.



La evolución tecnológica impulsa a la búsqueda de nuevos nichos de mercados y sin duda la existencia de un mercado altamente dinámico, que requiere de una elevada capacidad de adaptación y anticipación para satisfacer las necesidades de los usuarios así como para hacer frente a los competidores, en un entorno marcado también por la evolución de los modelos de negocio, la aparición de nuevos agentes o la modificación del papel jugado por agentes ya presentes. En este sentido, la Figura 1-2 ilustra uno de los principales paradigmas observados en los últimos tiempos³.

En efecto, mientras que el incremento del tráfico de voz supone un incremento de los ingresos del operador al facturarse por establecimiento de llamada y tiempo de ocupación de los recursos del sistema, en el caso del tráfico de datos se produce un desfase entre ambos, asociado a la adopción de tarifas planas. Por otra parte, tal y como se ilustra en la Figura 1-3, el coste del despliegue y operación de las redes de comunicaciones móviles con la tecnología actual guarda cierta proporcionalidad con el volumen de tráfico a cursar si se pretende ofrecer una QoS adecuada, de manera que para preservar un cierto margen de beneficio es necesario reducir diferentes componentes de la estructura de costes, lo que constituye una de las principales motivaciones para el desarrollo de un sistema como LTE³.

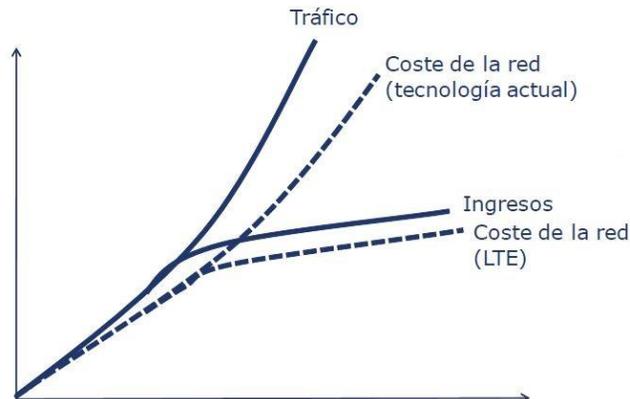
Figura 1-2. Paradigma de la evolución del mercado de comunicaciones móviles.



² Tomado de: TECHNICAL WHITE PAPER: Long Term Evolution (LTE): A Technical Overview.

³ Tomado de: LTE: NUEVAS TENDENCIAS EN COMUNICACIONES MÓVILES.

Figura 1-3. Relación del costo de la red con el volumen de tráfico.



El objetivo de LTE es proporcionar un radio acceso de alta velocidad de datos, baja latencia y optimizado de paquetes tecnología de apoyo a los despliegues flexibles de ancho de banda. En la red de forma paralela, la nueva arquitectura está diseñada con el objetivo de apoyar el tráfico de conmutación de paquetes, calidad del servicio y una latencia mínima [1].

El sistema es compatible con anchos de banda flexibles, gracias a OFDMA y SC-FDMA como esquemas de acceso. Además de FDD (dúplex por división de frecuencia) y TDD (*dúplex por división de tiempo*), half dúplex FDD se le permite portar UEs de bajo costo. A diferencia de FDD, en half-duplex FDD la operación un UE no se requiere para transmitir y recibir al mismo tiempo. Esto evita la necesidad de un costo o impresión a doble cara en la UE. El sistema está principalmente optimizado para bajas velocidades de hasta 15 km/h. Sin embargo, las especificaciones del sistema permiten apoyar la movilidad de más de 350 km/h con un poco de rendimiento de gradación. El acceso de enlace ascendente se basa en el acceso a división de la frecuencia portadora múltiple (SC-FDMA) que promete una mayor cobertura de enlace ascendente debido a una menor relación de potencia de pico al promedio (*PARP peak-to-average power ratio*) en relación con OFDMA [1].

El sistema soporta velocidades de datos pico de bajada de 326 Mb/s con 4x4 MIMO (*múltiple de entrada múltiple salida*) en ancho de banda de 20 MHz. Desde enlace ascendente MIMO no se emplea en la primera versión del estándar LTE, las velocidades máximas de subida de datos se limita a 86 Mb/s en ancho de banda de 20 MHz. Además de los picos mejora la tasa de datos, el sistema LTE proporciona a cuatro veces más alta eficiencia de las células del espectro en relación con el sistema de HSPA de la Versión 6. Mejoras similares se observan en la transmisión de la celda de punta, manteniendo el mismo sitio de trabajo que desplegó para HSPA. En cuanto a la latencia, la radio LTE y la interfaz de red proporcionan capacidades de menos de 10 ms para la latencia de transmisión de un paquete desde la red a la UE.

1.1. Especificaciones técnicas de LTE

Los avances tecnológicos en el ámbito de las comunicaciones móviles en las últimas décadas han evolucionado de tal manera que nos ha permitido la experiencia de servicios tales como la mensajería multimedia, acceso a servicios web, carga y descarga de paquetes de datos. Más allá de los servicios básicos que nos ofrecen nuestros operadores locales de telefonía conmutada se espera que con los

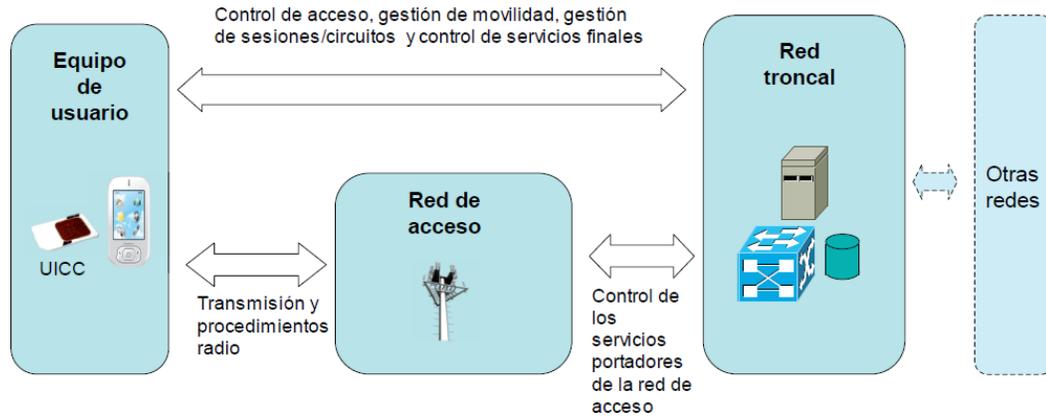
lineamientos del ministerio de comunicaciones de Colombia y sus proyecciones para los próximos años en Colombia nos permitan experimentar con servicios verdaderamente convergentes y con velocidades de transferencia de datos muy altas las cuales nos permitirán realizar tareas cada vez más complejas con nuestros dispositivos personales [1].

El término LTE se acuñó inicialmente en 3GPP para denominar una línea de trabajo interna cuyo objeto de estudio era la evolución de la red de acceso de UMTS, denominada como UTRAN. Formalmente, la nueva red de acceso recibe el nombre de E-UTRAN (Evolved UTRAN) aunque muchas veces se utiliza también el término LTE en las especificaciones como sinónimo de E-UTRAN. Asimismo, en lo concerniente a la red troncal, 3GPP utilizó el término SAE (System Architecture Evolution) para referirse a las actividades de estudio relacionadas con la especificación de una red troncal evolucionada de conmutación de paquetes. Formalmente, dicha red troncal se denomina EPC (Evolved Packet Core) o también *Evolved 3GPP Packet Switched Domain*, y de la misma forma que pasa con la red de acceso, es común encontrar el término de SAE como sinónimo de EPC. La combinación de la red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC es lo que constituye la nueva red UMTS evolucionada y recibe el nombre formal de EPS (*Evolved Packet System*). La primera especificación del sistema EPS ha sido incluida en la Versión 8 de las expediciones del 3GPP [2].

En la figura 2-1 se ilustra una arquitectura a muy alto nivel para la identificación de tres componentes básicos en este tipo de modelos de comunicaciones móviles:

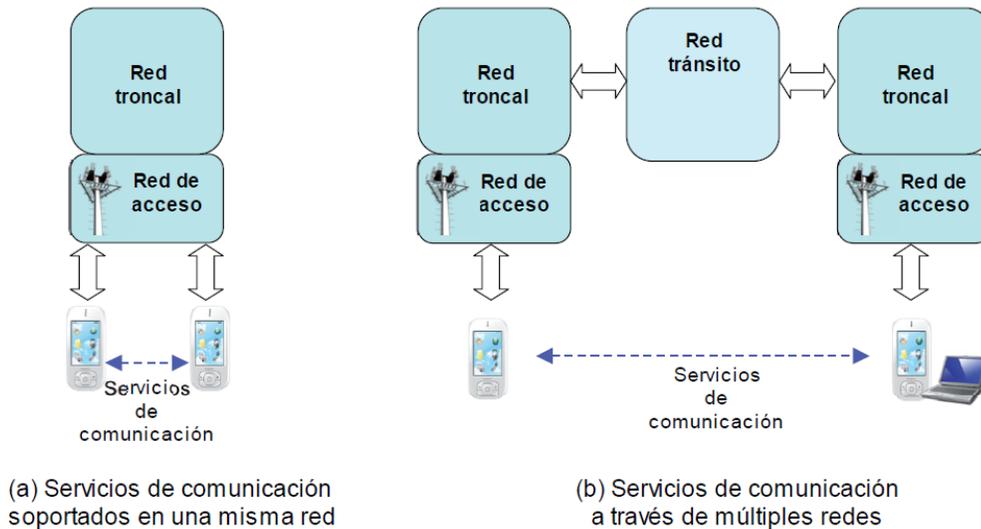
- Equipo de usuario, dispositivo que permite al usuario acceder a los servicios de la red. El equipo de usuario puede incluir una tarjeta inteligente (*Universal Integrated Circuit Card, UICC*) que contenga la información necesaria para permitir la conexión a la red y la utilización de sus servicios (*identificador único del usuario en el sistema de comunicaciones*). El equipo de usuario se conecta a la red de acceso a través de una interfaz radio.
- Red de acceso, parte del sistema responsable de sustentar la transmisión radio con los equipos de usuario de cara a proporcionar la conectividad necesaria entre éstos y los equipos de la red troncal. Los servicios de transmisión ofrecidos por la red de acceso para transportar la información de los equipos de usuario (*tanto información de datos como señalización*) hacia/desde la red troncal son servicios portadores, es decir, servicios cuya finalidad última es la provisión de una cierta capacidad de transmisión. La red de acceso es la responsable de gestionar el uso de los recursos radio disponible para la provisión de servicios portadores de forma eficiente. La activación de los recursos de transmisión en la red de acceso se controla generalmente desde la red troncal. La red de acceso está formada por estaciones base y en los sistemas móviles actuales 2G y 3G, también por equipos controladores de las estaciones base.
- Red troncal, parte del sistema encargado de aspectos tales como control de acceso a la red celular (*autenticación de los usuarios del sistema*), gestión de la movilidad de los usuarios, gestión de las sesiones de datos o circuitos que transportan la información de los usuarios, mecanismos de interconexión con otras redes, etc. También pueden formar parte de la red troncal las funciones asociadas con el control de los servicios finales ofrecidos a los usuarios (*control y señalización asociada al servicio de telefonía*). La red troncal está formada por equipos que albergan funciones de conmutación de circuitos, encaminamiento de paquetes (*routing*), bases de datos, etc.

Figura 1-4. Arquitectura genérica de un sistema celular



En la Figura 2-2 se muestran dos escenarios representativos de la provisión de servicios de comunicación a través de redes de comunicaciones móviles celulares. En el escenario (a) se ilustra una red celular que sustenta servicios de comunicación (*llamadas de voz*) entre los equipos de usuario conectados a ella. En el escenario (b) se muestra la provisión de los servicios de comunicación entre equipos de usuario operando en redes celulares diferentes interconectadas entre sí mediante redes de tránsito. En la misma línea, en la Figura 2-3 se representa un escenario ilustrativo de la provisión de servicios entre equipos conectados a redes celulares y equipos localizados en otras redes (*red telefónica, Internet, etc.*) [2].

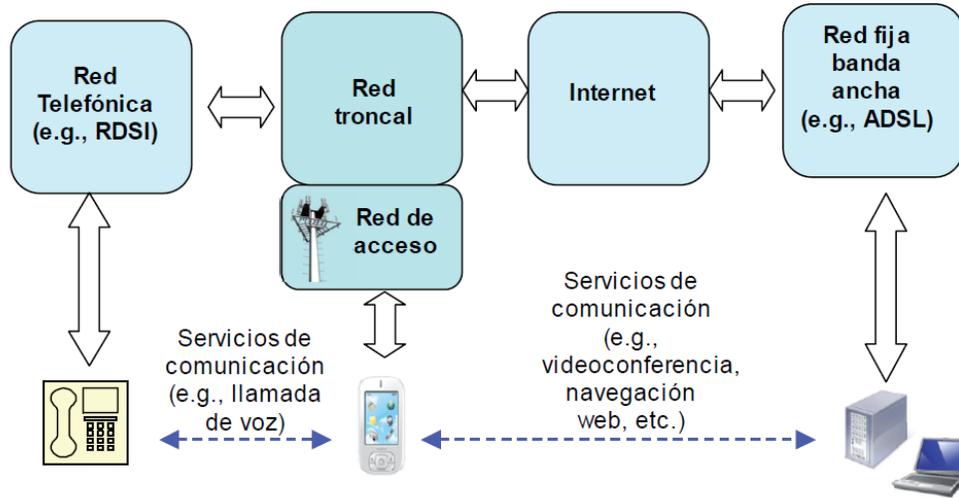
Figura 1-5. Escenarios de suministro de servicios de comunicación en redes celulares.



(a) Servicios de comunicación soportados en una misma red

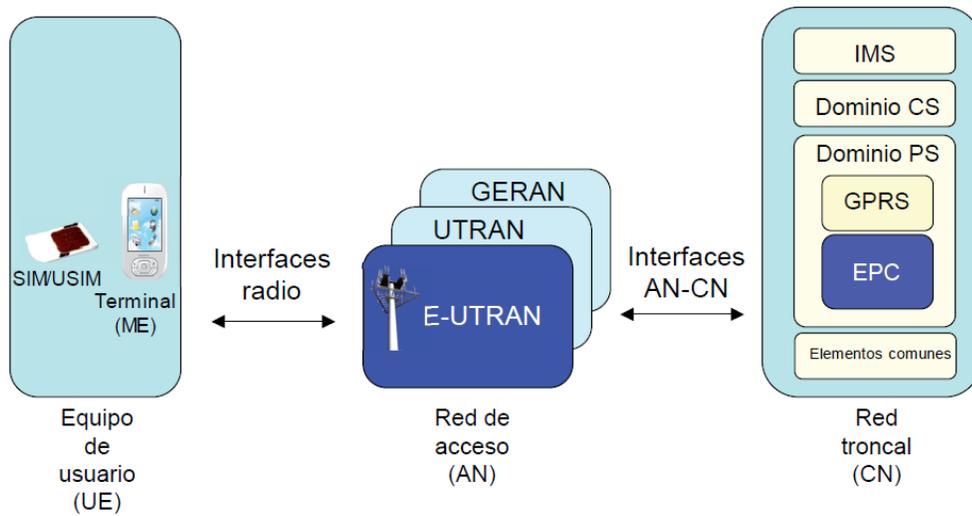
(b) Servicios de comunicación a través de múltiples redes

Figura 1-6. Escenarios de suministro de servicios de comunicación en redes celulares y otras redes.



Las arquitecturas de red contempladas en la familia de sistemas especificados por 3GPP se adaptan a la arquitectura genérica descrita en el apartado anterior. Así pues, tal como se representa en la Figura 2-4, los sistemas 3GPP abarcan la especificación del equipo de usuario (*User Equipment*, UE) y de una infraestructura de red que se divide de forma lógica en una infraestructura de red troncal (*Core Network*, CN) y una de red de acceso (*Access Network*, AN).

Figura 1-7. Arquitectura de alto nivel de los sistemas 3GPP (GSM, UMTS y LTE)⁴



1.2. Arquitectura genérica de los sistemas 3GPP

El equipo de usuario en 3GPP se compone de dos elementos básicos: el propio dispositivo móvil o terminal (denominado como *Mobile Equipment*, ME, en las especificaciones) y una tarjeta UICC. La tarjeta UICC, también denominada SIM (*Subscriber Identity Module*) en sistemas GSM y USIM (*Universal SIM*) en UMTS y LTE, es la encargada de almacenar la información y sustentar los procedimientos que tienen que ver con la suscripción del usuario a los servicios proporcionados por la red. Mediante esta separación entre terminal y tarjeta se permite que un usuario (identificado a través de la SIM/USIM) pueda utilizar diferentes terminales para acceder a la red [2].

Respecto a la red de acceso, 3GPP ha especificado tres tipos de redes de acceso diferentes: GERAN (*GSM/EDGE Radio Access Network*), UTRAN (*UMTS Terrestrial Radio Access Network*) y E-UTRAN (*Evolved UTRAN*). Las redes de acceso GERAN y UTRAN forman parte del sistema 3G UMTS mientras que E-UTRAN es la nueva red de acceso del sistema LTE. Cada red de acceso define su propia interfaz radio para la comunicación con los equipos de usuario: GERAN, también denominada de forma habitual simplemente como GSM, utiliza un acceso basado en TDMA, la tecnología utilizada en UTRAN es WCDMA y, E-UTRAN ha apostado por la tecnología OFDMA. Asimismo, la interconexión de las redes de acceso a la red troncal se realiza mediante interfaces AN-CN específicas a cada una de ellas [2].

Respecto a la red troncal, ésta se divide de forma lógica en un dominio de circuitos (*Circuit Switched, CS, Domain*), un dominio de paquetes (*Packet Switched, PS, Domain*) y el subsistema IP Multimedia (*IP Multimedia Subsystem, IMS*). Estos tres componentes bajo sus siglas como dominio CS, dominio PS y subsistema IMS, respectivamente. El dominio CS alberga a todas las entidades de la red troncal que participan en la provisión de servicios de telecomunicación basados en conmutación de circuitos, es decir, servicios a los que se les asignan recursos de forma dedicada (circuitos) en el momento de establecimiento de la conexión, manteniéndose éstos hasta la finalización del servicio (*servicios de voz y videoconferencia en redes UMTS*). El dominio de circuitos de la red troncal es accesible a través de las redes de acceso UTRAN y GERAN. En cambio, el diseño de E-UTRAN no contempla el acceso al dominio CS ya que todos los servicios se proporcionan a través del dominio PS [2].

El dominio PS incluye a las entidades de la red troncal que proporcionan servicios de telecomunicación basados en conmutación de paquetes: la información de usuario se estructura en paquetes de datos que se encaminan y transmiten por los diferentes elementos y enlaces de la red. En particular, el dominio PS proporciona un servicio de conectividad a redes de paquetes (*Redes IP y X.25*). Existen dos implementaciones diferentes del dominio PS: GPRS y EPC. GPRS es la implementación del dominio PS que se desarrolló inicialmente en el contexto de redes GSM y que actualmente también forma parte del sistema UMTS. Los servicios de conectividad por paquetes de GPRS son accesibles tanto a través de UTRAN como de GERAN [2].

EPC es la nueva especificación del dominio PS desarrollada en el contexto del sistema LTE. EPC es una implementación evolucionada de GPRS que ha sido optimizada para proporcionar un servicio de conectividad IP a los equipos de usuario a través de E-UTRAN. El dominio EPC también ha sido concebido para soportar el acceso al servicio de conectividad IP desde las otras redes de acceso 3GPP (UTRAN y GERAN) así como desde redes no 3GPP (Redes CDMA2000, Mobile WiMAX, etc.) [2].

En la red troncal existen también elementos que soportan funciones asociadas a los diferentes dominios. Un ejemplo claro es la base de datos que contiene la información de los usuarios del sistema (HSS, *Home Subscriber Server*) y sobre la que se sustenta la operación de los dominios CS y PS, así como del subsistema IMS comentado a continuación.

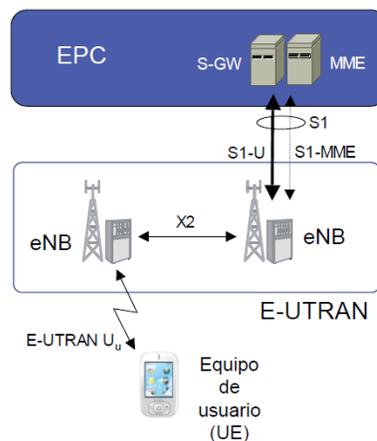
También como parte de la red troncal, el subsistema IMS comprende los elementos de ésta relacionados con la provisión de servicios IP multimedia basados en el protocolo SIP (*Session Initiation Protocol*) de IETF (*Internet Engineering Task Force*). El subsistema IMS es responsable de la señalización asociada a los servicios multimedia y utiliza como mecanismo de transporte los servicios de transferencia de datos proporcionados por el dominio PS (*el equipo de usuario y los equipos del subsistema IMS o redes externas se comunican entre sí a través del servicio de conectividad IP ofrecido por el dominio PS*). En este sentido, el subsistema IMS constituye el plano de control de dichos servicios quedando claramente separadas las funciones asociadas al transporte de la información (*funciones asociadas al dominio PS*) y las funciones propias de la capa de control de los servicios (*señalización a nivel de aplicación*). Esta separación entre las funciones de transporte y las de control de los servicios adoptada en LTE está en consonancia con los trabajos desarrollados en otros organismos de estandarización como ETSI (*TISPAN*) y ITU-T (*NGN-GSI*) respecto a la especificación de las arquitecturas de los futuros sistemas de telecomunicación basados íntegramente en redes de conmutación de paquetes y que responden a la denominación de *Next Generation Networks* (NGN). La arquitectura completa de la familia de estándares 3GPP se proporciona en la especificación TS 3GPP 23.002 [2].

1.3. Red de acceso evolucionado 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). La descripción de la arquitectura de E-UTRAN se detalla en las especificaciones del 3GPP TS 36.300 y TS 36.401.

Tal y como se ilustra en la Figura 2-5, una red de acceso E-UTRAN está formada por eNBs que proporcionan la conectividad entre los equipos de usuario (UE) y la red troncal EPC. Un eNB se comunica con el resto de elementos del sistema mediante tres interfaces: E-UTRAN Uu, S1 y X2.

Figura 1-8. Red de acceso E-UTRAN⁴



⁴ Tomado de: ITU-R 3GPP TS25.401 y TS36.300. Formalmente, una entidad de red en 3GPP representa una entidad lógica que cubre una funcionalidad perfectamente delimitada. Por tanto, una entidad de red es una entidad funcional.

1.4. Entidades de red e interfaces

La interfaz E-UTRAN Uu, también denominada LTE Uu o simplemente interfaz radio LTE, permite la transferencia de información por el canal radio entre el eNB y los equipos de usuario. Todas las funciones y protocolos necesarios para realizar el envío de datos y controlar la operativa de la interfaz E-UTRAN Uu se implementan en el eNB. El eNB se conecta a la red troncal EPC a través de la interfaz S1. Dicha interfaz está desdoblada en realidad en dos interfaces diferentes: S1-MME para sustentar el plano de control y S1-U como soporte del plano de usuario. La separación entre plano de control y plano de usuario es una característica importante en la organización de las torres de protocolos asociadas a las interfaces de la red LTE⁵.

El plano de usuario de una interfaz se refiere a la torre de protocolos empleada para el envío de tráfico de usuario a través de dicha interfaz (Ejemplo, paquetes IP del usuario que se envían entre E-UTRAN y EPC a través de S1-U). Por otro lado, el plano de control se refiere a la torre de protocolos necesaria para sustentar las funciones y procedimientos necesarios para gestionar la operación de dicha interfaz o de la entidad correspondiente (Ejemplo, configuración de la operativa del eNB desde la red EPC a través de S1-MME). Esta separación entre plano de control y plano de usuario en la interfaz S1 permite realizar la conexión del eNB con dos nodos diferentes de la red troncal. Así, mediante la interfaz S1-MME, el eNB se comunica con una entidad de red de la EPC encargada únicamente de sustentar las funciones relacionadas con el plano de control (dicha entidad de red de la red troncal EPC se denomina Mobility Management Entity, MME)⁵.

Por otro lado, mediante la interfaz S1-U, el eNB se comunica con otra entidad de red encargada de procesar el plano de usuario (dicha entidad de red de la EPC se denomina Serving Gateway, S-GW). Esta separación entre entidades de red dedicadas a sustentar el plano de control o bien el plano de usuario es una característica importante de la red LTE que permite dimensionar de forma independiente los recursos de transmisión necesarios para el soporte de la señalización del sistema y para el envío del tráfico de los usuarios. Opcionalmente, los eNBs pueden conectarse entre sí mediante la interfaz X2. A través de esta interfaz, los eNB se intercambian tanto mensajes de señalización destinados a permitir una gestión más eficiente del uso de los recursos radio (Ejemplo, información para reducir interferencias entre eNBs) así como tráfico de los usuarios del sistema cuando estos se desplazan de un eNB a otro durante un proceso de *handover*.

En la Tabla 1-3 se resumen las entidades de red e interfaces de E-UTRAN y se indican las principales especificaciones del 3GPP relacionadas con cada una de ellas.

Tabla 1-3. Entidades de red e interfaces E-UTRAN⁵.

Entidades de red	Denominación	Descripción	Referencias 3GPP ¹⁾
		Evolved NodeB (eNB)	Estación base de la red de acceso E-UTRAN
Interfaces	Denominación	Entidades de red asociadas	
	E-UTRAN Uu (también denominada LTE Uu o interfaz radio)	eNB UE	TS 36.300 [4] Documentos TS 36.2xx Y TS 36.3xx
	X2	eNB eNB	Documentos TS 36.42x TS 29.281 [26]
	S1-MME	eNB Red troncal EPC (MME)	Documentos TS 36.41x
	S1-U	eNB Red troncal EPC (S-GW)	TS 29.281 [26]

⁵ Tomado de: ITU-R 3GPP TS25.401 y TS36.300.

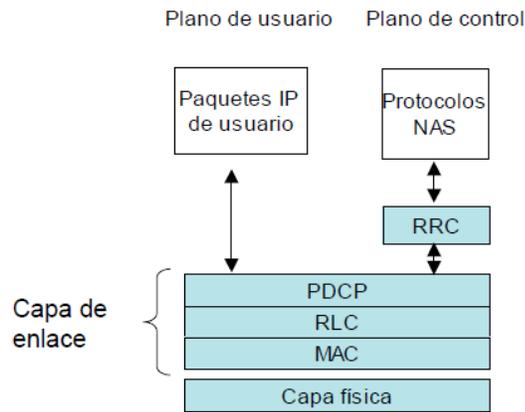
1.5. Protocolos

Las torres de protocolos utilizadas en las tres interfaces de E-UTRAN (radio, S1 y X2) se estructuran en torno a un plano de usuario y un plano 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 [2].

1.5.1. Protocolos en la interfaz de radio

El envío de paquetes IP entre el eNB y un equipo de usuario a través de la interfaz radio se sustenta en una torre de protocolos formada por una capa de enlace (o capa de nivel 2) y una capa física. La torre de protocolos utilizada se muestra en la Figura 2.6. La capa de enlace se desglosa a su vez en tres subcapas: *Packet Data Convergence Protocol* (PDCP), *Radio Link Control* (RLC) y *Medium Access Control* (MAC). Cada capa/subcapa de la torre de protocolos se ocupa de un conjunto de funciones concreto y define el formato de los paquetes de datos (Ejemplo, cabeceras y colas) que se intercambian entre entidades remotas [1].

Figura 1-9. Protocolos de la interfaz de radio E-UTRAN⁶.



- *Packet Data Convergence Protocol* (PDCP). Constituye la capa superior de la torre de protocolos encargada de proporcionar el punto de acceso al servicio portador radio (*Radio Bearer*, RB). Es decir, los paquetes IP del tráfico de usuario se entregan y se reciben a través del servicio de transferencia proporcionado por la capa PDCP. Las funciones principales de esta capa son la compresión de cabeceras de los paquetes IP y el cifrado de la información para garantizar su confidencialidad e integridad. La cabecera añadida por la capa PDCP básicamente contiene un número de secuencia que identifica al paquete IP enviado y permite realizar una entrega ordenada de los paquetes IP en el extremo receptor así como detectar posibles duplicados de los paquetes IP (ocasionados por ejemplo en un proceso de *handover*). Cada servicio portador radio tiene una entidad PDCP asociada.

⁶ La estructura de protocolos utilizada en E-UTRAN se trata en 2.6.

- *Radio Link Control (RLC)*. La capa RLC permite enviar de forma fiable los paquetes PDCP entre el eNB y equipo de usuario. Para ello, la capa RLC soporta funciones de corrección de errores mediante mecanismos *Automatic Repeat ReQuest (ARQ)*, concatenación, segmentación y re-ensamblado, entrega ordenada de paquetes PDCP a capas superiores (excepto durante el mecanismo de *handover*), detección de duplicados y detección/recuperación de errores en el protocolo. Cada servicio portador radio tiene una entidad RLC asociada.
- *Medium Access Control (MAC)*. Es la capa encargada de controlar el acceso al canal radio. Para ello, la capa MAC soporta funciones de *scheduling* dinámico entre equipos de usuario atendiendo a prioridades, multiplex a los paquetes RLC de diferentes servicios portadores radio en los canales de transporte ofrecidos por la capa física (un canal de transporte puede ser compartido por varios servicios portadores de uno o varios equipos de usuario) y realiza un control de errores mediante *Hybrid ARQ (HARQ)*. Los servicios de transferencia que la capa MAC ofrece a la capa RLC se denominan canales lógicos. Existe una única entidad MAC por celda.
- *Capa física*. Es la capa encargada de realizar la transmisión propiamente dicha a través del canal radio. Alberga funciones de codificación de canal, modulación, procesado asociado a las técnicas de múltiples antenas de transmisión/recepción, y mapeo de la señal a los recursos físicos frecuencia-tiempo apropiados. En el enlace ascendente, la capa física se basa en un esquema *single-carrier FDMA*. En el enlace descendente, el esquema de transmisión es OFDMA. Los servicios de transferencia que la capa física ofrece a la capa MAC se denominan canales de transporte. Existe una única entidad de capa física por celda.

Respecto al plano de control entre el equipo de usuario y la red, éste se soporta sobre la misma capa de enlace (protocolos PDCP, RLC, MAC) y la misma capa física utilizadas en el plano de usuario. Los protocolos de nivel de red específicos de este plano son:

Radio Resource Control (RRC). Esta capa permite establecer una conexión de control entre el eNB y un equipo de usuario a través de la cual se llevan a cabo un número importante de funciones relacionadas con la gestión de la operativa de la interfaz radio. Entre dichas funciones de la capa RRC destacan los mecanismos de gestión de los servicios portadores radio (Ejemplo, señalización para el establecimiento/liberación/modificación de los portadores radio), el soporte de funciones de movilidad (Ejemplo, señalización de *handover*), la difusión (*broadcast*) de parámetros de sistema y funciones de aviso de los terminales que no disponen de una conexión RRC establecida (Ejemplo, envío de avisos a través del canal de *paging*). El servicio de transferencia que ofrece la capa PDCP para el envío de los mensajes de señalización del protocolo RRC se denomina servicio portador de señalización (*Signalling Radio Bearer, SRB*).

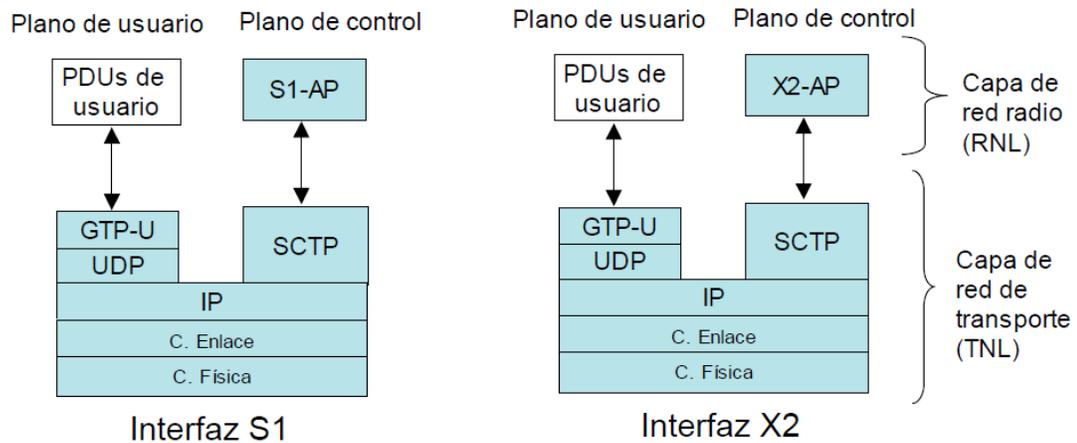
Señalización de los protocolos NAS. Los protocolos NAS se extienden entre la entidad de red MME en la red troncal y el equipo de usuario. Los mensajes de estos protocolos se transportan de forma transparente en la interfaz radio encapsulados dentro de la parte de datos de los mensajes RRC. Las principales funciones de los protocolos NAS son: autenticación, autorización, gestión de movilidad de los terminales que no tienen una conexión RRC establecida y gestión de los servicios portadores de la red EPS.

1.5.2. Protocolos de las interfaces S1 y X2

La estructura de protocolos utilizada en E-UTRAN para soportar las interfaces S1 y X2 establece una separación entre la capa de red radio (*Radio Network Layer, RNL*) y la capa de red de transporte (*Transport Network Layer, TNL*)⁶. Esta descomposición tiene como objetivo aislar las funciones que son específicas del sistema de comunicaciones móviles (UMTS o LTE), de aquellas otras que dependen de

la tecnología de transporte utilizada (Ejemplo, IP, ATM). De esta forma, los protocolos específicos de la red de acceso radio constituyen la capa RNL mientras que la capa TNL alberga los protocolos utilizados para el transporte de la información de la capa RNL entre las entidades de la red. En la Figura 2-7 se ilustra la arquitectura de protocolos de las interfaces S1 y X2⁷. Los documentos base del 3GPP que especifican la estructura de las interfaces S1 y X2 son respectivamente, 3GPP TS36.410 y TS 36.420 [2].

Figura 1-10. Protocolos en las interfaces S1 (izquierda) y X2 (derecha)⁷

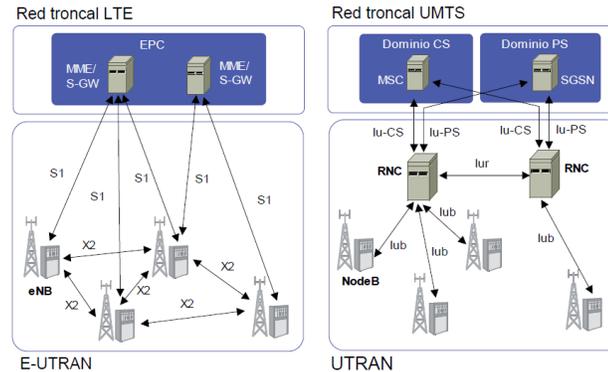


1.6. Comparación E-UTRAN y UTRAN

La arquitectura E-UTRAN presenta importantes diferencias con respecto a las redes de acceso UTRAN y GERAN. En la Figura 2-8 se muestra a nivel ilustrativo un despliegue simple de una red E-UTRAN y de una red UTRAN, como ejemplo típico tanto de redes de acceso 3G como 2G, en aras a comparar ambas arquitecturas.

Las redes de acceso anteriores a E-UTRAN se basan en una arquitectura jerárquica donde las funciones de la red de acceso se distribuyen en dos tipos de nodos: estaciones base (denominados Nodos B en UTRAN) y equipos controladores de estas estaciones base (denominados RNC en UTRAN). La arquitectura de UTRAN se especifica en el documento 3GPP TS25.401. En esta arquitectura jerarquizada, los equipos controladores albergan el plano de control de la interfaz radio (señalización de control del enlace radio) así como múltiples funciones del plano de usuario (algunas funciones de la capa de acceso al medio, control de enlace, compresión de cabeceras, etc.). Por otro lado, las estaciones base se ocupan principalmente de las funciones de transmisión radio (procesado de capa física) y su operación se gestiona de forma remota desde los equipos controladores. La interconexión entre estaciones base y controladores se realiza mediante una interfaz denominada Iu de forma que la topología de red resultante a nivel lógico es una topología en forma de estrella. Los equipos controladores también pueden conectarse entre sí mediante interfaces específicas como la interfaz Iu que, en el caso de UTRAN, permite la explotación del mecanismo de *macro diversidad* entre dos Nodos B que se encuentren conectados a RNCs diferentes. La interconexión de la red de acceso a la troncal se realiza a través de los equipos controladores mediante las interfaces Iu-PS, entre RNCs y los nodos SGSNs del dominio de paquetes, y Iu-CS, entre RNCs y las centrales de conmutación MSC del dominio de circuitos [3].

⁷ Tomado de los documentos 3GPP TS36.410 y TS 36.420.

Figura 1-11. Comparativa de la arquitectura de red de E-UTRAN y UTRAN⁸

1.7. Requerimientos fundamentales de una red LTE-A

LTE-Advanced es el candidato 3GPP de radio-acceso a la tecnología para el acceso de radio de las IMT-Advanced, un requisito obvio para LTE-Advanced es la realización plena de todos los requisitos para las IMT-Advanced se define por la UIT. Otro requisito básico para el trabajo en LTE-Advanced, es que LTE-Advanced es una evolución de LTE. La implicación de esto es que LTE-Advanced tiene que cumplir una serie de requisitos básicos de compatibilidad con versiones anteriores.

LTE-Advanced debe proporcionar compatibilidad con versiones anteriores en términos de espectro y convivencia, lo que implica que debe ser posible desplegar LTE-Advanced en el espectro ya ocupado por LTE, sin impacto sobre las actuales terminales LTE. Una consecuencia directa de este requisito es que, para la liberación de un terminal de LTE, un celular LTE-Advanced debe aparecer como un lanzamiento de versión 8 LTE. Esto es similar a HSPA, donde uno de los primeros terminales WCDMA puede acceder a una celda de apoyo HSPA, aunque desde el punto de vista de este terminal, la celda aparecerá como una versión 9 WCDMA. La compatibilidad de dicho espectro es de importancia crítica para un bajo costo sin problemas, transición a LTE-Advanced capacidades dentro de la red [3].

LTE-Advanced también debe ser "compatible" en términos de infraestructura, en la práctica lo que implica que debe ser posible para actualizarla infraestructura de equipos ya instalado LTE para soportar los requerimientos de capacidad para LTE-Advanced con un costo razonable. También este es un requisito previo fundamental para una transición suave y de bajo costo para una red LTE-Advanced. LTE-Advanced debe ser "compatible" en términos de la implementación del terminal, lo que implica que debe ser posible introducir LTE-Advanced funcionalidad en los terminales móviles con una complejidad razonable incremental con su costo asociado en comparación con la capacidad de LTE actual. Esto es claramente vital para garantizar una adopción de la tecnología LTE-Advanced para la existencia de una rápida capacidad en la compatibilidad de los terminales [3].

Se trata de un entendimiento común dentro de 3GPP LTE-Advanced que no debe ser limitada al cumplimiento de los requisitos de la UIT sobre las IMT-Advanced. Más bien, LTE-Advanced debe ir más allá de los requisitos de IMT-Advanced y por lo tanto los objetivos de LTE-Advanced son mucho más ambiciosos, que incluyen:

- Apoyo a los picos de datos de hasta 1 Gbps en el down link y 500 Mbps en el de enlace ascendente.
- Las mejoras sustanciales en el rendimiento del sistema, tales como células y el usuario, el rendimiento de los valores objetivo significativamente superiores a los de las IMT-Avanzadas.
- Posibilidad de despliegue de infraestructura de bajo costo y terminales.
- La eficiencia de alta potencia, es decir, bajo consumo de energía de ambas terminales e infraestructura.
- Utilización eficiente del espectro, incluida la utilización eficiente de la fragmentación del espectro.

1.8. Tecnologías propias de LTE

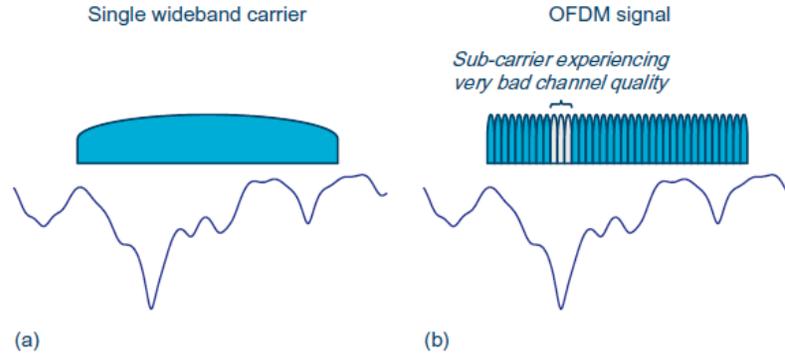
Una breve descripción de los componentes tecnológicos potenciales de LTE-Advanced que menciono son los más relevantes en la documentación propuesta por el 3GPP discutidos en sus apartes. Es importante entender sin embargo que en el momento de la escritura, lo propuesto sobre LTE-Advanced en 3GPP se encuentra todavía en su fase de desarrollo.

1.8.1. Acceso Múltiple por división de frecuencia ortogonal OFDMA

Un canal de radio está siempre sujeto a un cierto grado de selectividad de frecuencia, lo que implica que la calidad del canal variará en el dominio de la frecuencia. En el caso de una portadora de banda ancha única, como un portador WCDMA, cada símbolo de modulación se transmite sobretodo el ancho de banda de la señal. Así, en el caso de la transmisión de una portadora de banda ancha solo la frecuencia más altamente se selecciona del canal (Figura 2-9), cada símbolo de modulación será transmitida ambas bandas de frecuencia más con una calidad relativamente buena (intensidad de la señal relativamente alta) y la frecuencia con bandas de baja calidad (baja intensidad de señal). Esta transmisión de información a través de múltiples bandas de frecuencias con una calidad diferente de canal instantáneo también se conoce como diversidad de frecuencias [4].

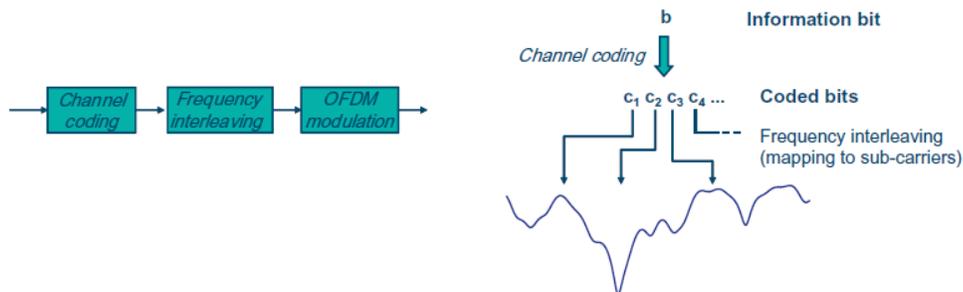
Por otro lado, en el caso de transmisión de cada símbolo OFDM la modulación se limita principalmente a un ancho de banda relativamente estrecho. Así, para la transmisión OFDM sobre un canal de frecuencia selectivo, ciertos símbolos de modulación puede ser totalmente confinado a una banda de frecuencia instantánea con muy baja intensidad de la señal, como se ilustra en la (Figura 2-9). Así, los símbolos de modulación individuales típicamente no experimentan ninguna diversidad de frecuencias considerable, incluso si el canal es muy selectivo a la frecuencia sobre el ancho de banda total de transmisión OFDM. Como consecuencia, la tasa de error de base de rendimiento de transmisión OFDM sobre un canal de frecuencia selectiva es relativamente pobre y muy especialmente peor que la tasa de error de base en el caso de un portador de banda ancha clave. Sin embargo, en la práctica la codificación de canal se utiliza en la mayoría de los casos de comunicación digital y especialmente en la comunicación móvil [4].

Figura 1-12. (a). Transmisión de banda ancha con única portadora, (b). Transmisión una frecuencia selectiva de canal OFDM. *Error! No se encuentra el origen de la referencia.*



Codificación de canal implica que cada bit de información a transmitirse extiende sobre varios bits de código, a menudo muchos de estos bits codificados son entonces a través de la modulación símbolos asignados a un conjunto de sub-portadoras OFDM que están bien distribuidas sobre la transmisión global del ancho de banda de la señal OFDM, como se ilustra en la (Figura 2-10), cada bit de información experimentará diversidad de frecuencia en el caso de transmisión a través de un canal de radiofrecuencia que es selectiva sobre el ancho de banda de transmisión, a pesar del hecho de que las sub-portadoras, y por tanto también los bits de código, no se experimenta la diversidad de frecuencia. La distribución de los bits de código en el dominio de la frecuencia, como se ilustra en la Figura 2-10, se refiere a veces como el intercalado de la frecuencia. Esto es similar a la utilización de dominio del tiempo con la intercalación de beneficios decodificación de canal en el caso de desvanecimiento que varía en el tiempo. Así, en contraste con la transmisión de una portadora de banda ancha única, la codificación de canal (combinado con frecuencia intercalada) es un componente esencial para la transmisión OFDM para poder beneficiarse de diversidad de frecuencia en un canal de frecuencia selectiva. Como la codificación de canal se utiliza normalmente en la mayoría de los casos de comunicación móvil esto no es un inconveniente muy serio, especialmente teniendo en cuenta que una significativa parte de la diversidad de frecuencias disponible puede ser capturada ya con una tasa de código relativamente alta [4].

Figura 1-13. Canal de codificación en combinación con el dominio de frecuencia intercalado para proporcionar diversidad de frecuencia en el caso de transmisión OFDM.

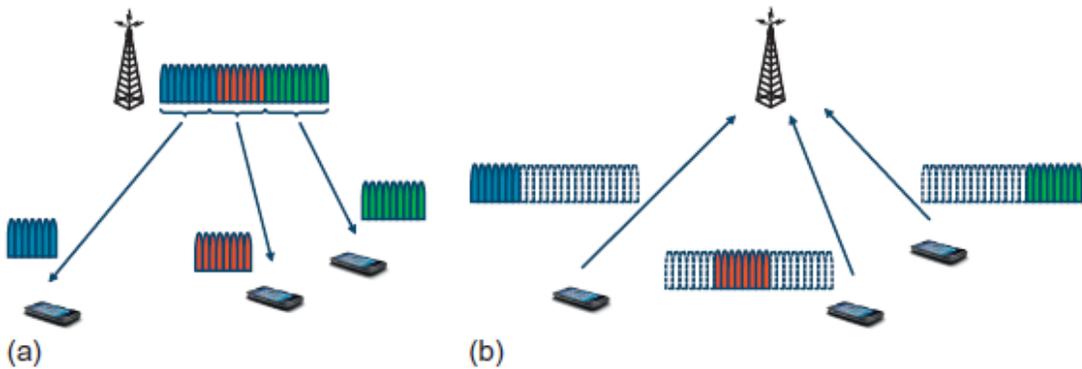


Todas las sub-portadoras OFDM se transmiten desde el mismo transmisor a un receptor determinado, es decir:

- Enlace descendente transmisión de todas las sub-portadoras a un solo terminal.
- Enlace ascendente transmisión de todas las sub-portadoras de un solo terminal.

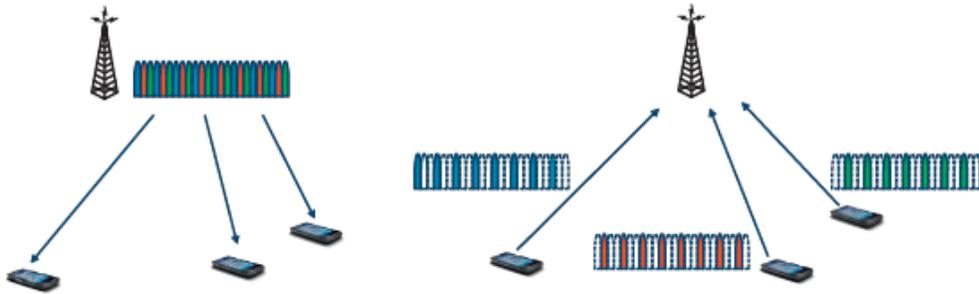
Sin embargo, OFDM también se puede utilizar como un esquema de multiplexación por el usuario o acceso múltiple, permitiendo simultánea de frecuencias separadas transmisiones desde y hacia múltiples terminales (Figura 2-11). En la dirección descendente, OFDM como un esquema de multiplexación por el usuario implica que, en cada uno de los intervalos de símbolo OFDM, diferentes subconjuntos del conjunto global de sub-portadoras disponibles se utilizan para la transmisión de los terminales diferentes (Figura 2-11a). De manera similar, en la dirección ascendente, OFDM como un esquema de multiplexación por el usuario o acceso múltiple implica que, en cada intervalo de símbolo OFDM, diferentes subconjuntos del conjunto global de sub-portadoras se utilizan para transmisión de datos desde diferentes terminales (Figura 2-11b). En este caso, el término frecuencia ortogonal de acceso múltiple por división u OFDMA es también a menudo empleada [4].

Figura 1-14. OFDM como un esquema usuario-multiplexado/múltiple-acceso: (a) de enlace descendente, (b) de enlace ascendente.



Se supone que sub-portadoras consecutivas se utilizan para su transmisión desde y hacia el mismo terminal. Sin embargo, la difusión de las sub-portadoras desde y hacia un terminal en el dominio de la frecuencia también es posible (Figura 2-12). La ventaja de dicho usuario distribuido multiplexado o distribuido de acceso múltiple es una posibilidad para la diversidad de frecuencias adicional como cada transmisión se extiende sobre un mayor ancho de banda. En el caso cuando se utiliza OFDMA como un enlace ascendente de acceso múltiple es decir, en el caso de multiplexación de frecuencia de señales OFDM de múltiples terminales es fundamental que las transmisiones de los diferentes terminales lleguen aproximadamente en tiempo ajustado en la estación base. Más específicamente, las transmisiones desde los diferentes terminales deben llegar a la estación base con una desalineación y temporización menor que la longitud del prefijo cíclico para preservar ortogonalidad entre sub-portadoras recibidas a partir de diferentes terminales y así evitar la interferencia inter-usuario [4].

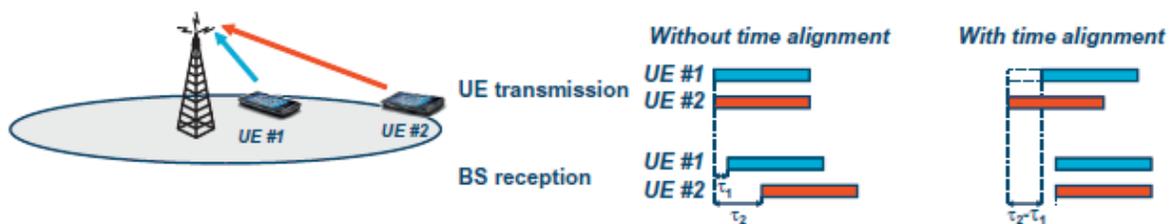
Figura 1-15. Multiplicación de usuario distribuida.



Debido a las diferencias en la distancia a la estación base para diferentes terminales y las correspondientes diferencias en el tiempo de propagación (que puede exceder la longitud del prefijo cíclico), es por tanto, necesaria para controlar la temporización de transmisión del enlace ascendente de cada terminal (Figura 2-13). Tal transmisión de control de temporización debe estar ajustada al tiempo de transmisión de cada terminal para asegurar que el enlace ascendente de transmisiones llega aproximadamente el tiempo ajustado en la estación base. A medida que el tiempo de propagación y cambios como el terminal se mueve dentro de la celda, el control de la transmisión-temporización debe ser un proceso activo, continuamente ajustar la temporización de transmisión exacta de cada terminal.

Además, incluso en el caso de transmisión control de temporización, siempre habrá alguna interferencia entre sub-portadoras, por ejemplo debido a errores de frecuencia [4].

Figura 1-16. Enlace ascendente de transmisión y control de tiempo.

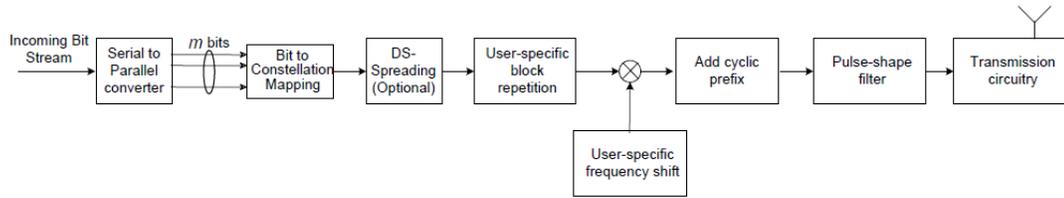


1.1.1 Acceso Múltiple por división de frecuencia ortogonal de portador simple SC-FDMA

Una señal de SC-FDMA puede en teoría ser generada tanto en el dominio del tiempo o de la frecuencia de dominio. Aunque las dos técnicas son duales y equivalentes 'funcionalmente', en la práctica, la generación en dominio de tiempo tiene un menor ancho de banda eficaz debido al filtrado de dominio de tiempo y requisitos asociados a la rampa de subida N . Se describen ambos enfoques para facilitar la comprensión de los principios de SC-FDMA en ambos dominios [5].

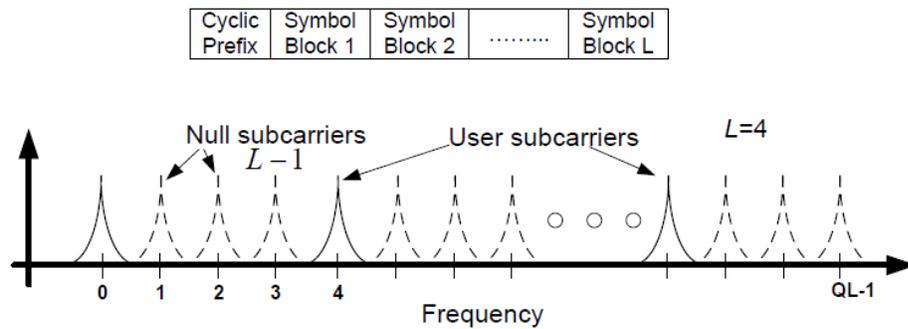
- Dominio del tiempo generación de la señal.

Figura 1-17. SC-FDMA el dominio del tiempo de procesamiento.



En la figura 2-14 Se puede observar que es similar a convencional de una sola portadora de transmisión. El flujo de bits de entrada se mapea en una corriente única portadora de QPSK o símbolos QAM, que se agrupan en símbolo de bloques de longitud M . Esto puede ser seguido por una etapa de repetición opcional, en el que cada bloque se repite varias veces L , y un desplazamiento de frecuencia específica del usuario, mediante el cual la transmisión de cada usuario puede ser traducido a una parte particular del ancho de banda disponible. Un CP se inserta a continuación. Después de filtrar (por ejemplo, con una raíz-coseno elevado pulso-filtro de conformación), la señal resultante es transmitida. La repetición de los bloques de símbolos resultantes en el espectro de la señal transmitida sólo de ser distinto de cero a frecuencias sub-portadoras concretas como se muestra en la Figura2-15 [5].

Figura 1-18. Transmisión distribuida con igualdad de separación entre sub-portadoras ocupadas.



Así, el espectro de la señal transmitida en este caso es similar a lo que se obtendría si sólo eran símbolos de datos modulados en cada sub-portadora L de una señal OFDM. Puesto que tal señal ocupa sólo una de cada sub-portadoras L , la transmisión se dice que es 'distribuido' y es una forma de proporcionar una ganancia de frecuencia diversa. Al variar la longitud de bloque M y la L factor de repetición, bajo la restricción de que el número total de posibles sub-portadoras ocupadas en el ancho de banda es constante ($ML=constante$), una amplia gama de velocidades de datos puede ser soportada [6].

Cuando la repetición de símbolo-bloque no se lleva a cabo ($L=1$), la señal ocupa sub-canales consecutivos y la transmisión se dice que es "localizada". Las transmisiones localizadas son beneficiosas para el apoyo de frecuencia selectiva de programación, por ejemplo cuando el eNodeB

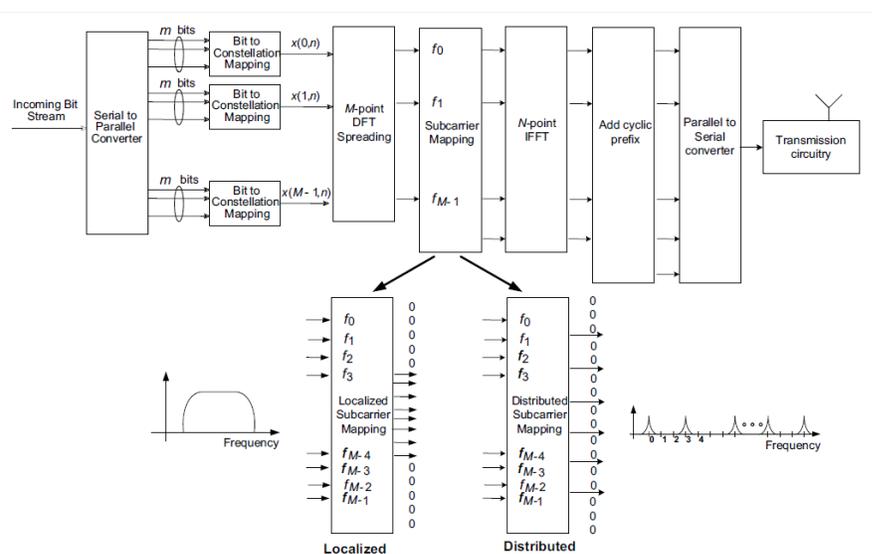
tiene conocimiento de las condiciones del canal de enlace ascendente. La transmisión localizada también puede proporcionar una diversidad de frecuencias si el conjunto de sub-portadoras consecutivas se salta en el dominio de la frecuencia, especialmente si el intervalo de tiempo entre saltos es más corto que la duración de un bloque de canal codificado de datos [7]. Las transmisiones de los distintos usuarios, utilizando los diferentes factores de repetición o anchos de banda, siendo ortogonal en el enlace ascendente, cuando se cumplan los siguientes requisitos:

- Los usuarios ocupan diferentes conjuntos de sub-portadoras. Esto puede ser logrado en general ya sea mediante la introducción de un cambio de frecuencia específica del usuario (típicamente para el caso de transmisiones localizadas) o, alternativamente, mediante la organización de los diferentes usuarios para ocupar conjuntos intercalados de sub-portadoras (típicamente para el caso de transmisiones distribuidas). El último método es conocido en la literatura como Acceso Múltiple por División de Frecuencia intercalada (IFDMA).
- Las señales recibidas son adecuadamente sincronizadas en tiempo y frecuencia.
- El CP es más largo que la suma de la dispersión del retardo del canal y ningún residuo temporizado de error de sincronización entre los usuarios.

Dominio de la frecuencia de generación de señal (DFT-S-OFDM).

Generación de una señal SC-FDMA en el dominio de la frecuencia utiliza una de Transformada de Fourier Discreta o (DFT-S-OFDM), como se muestra en la figura 2-16. El primer paso de la DFT-S-OFDM es la generación de señal SC-FDMA es realizar un M-punto DFT operación en cada bloque de símbolos de datos MQAM. Los ceros se insertan entonces entre los resultados de la DFT, a fin de que coincida con el tamaño de la DFT a un tamaño de N-sub-portadoras OFDM (típicamente una Transformada Rápida de Fourier Inversa (IFFT)). La salida de cero DFT se asigna a las sub-portadoras N, con las posiciones de los ceros a la determinación de que las sub-portadoras DFT-pre-codificadas se asignan los datos [8].

Figura 1-19. SC-FDMA dominio de la frecuencia de transmisión de procesamiento (DFT-S-OFDM) muestra la distribución del mapeo en sub-portadoras localizadas.



Por lo general, N es mayor que el número máximo de sub-portadoras ocupados, proporcionando así de sobre muestreo eficiente y 'sinc' ($\sin(x)/x$) formación de impulsos. La equivalencia de DFPS-OFDM y un dominio de tiempo generado por la transmisión de SC-FDMA puede verse fácilmente teniendo en cuenta el caso de $M=N$, donde la operación se cancela la DFT IFFT del OFDM modulado resultante en los símbolos de datos que se transmiten en serie en el dominio del tiempo. Sin embargo, esta construcción simple no proporciona ninguna forma de sobre muestreo o el pulso-filtrado. Al igual que con el enfoque en dominio de tiempo, DFT-S-OFDM es capaz de generar tanto localizada y distribuida transmisiones [8].

1.8.2. Evolución a la tecnología 4G

Los atributos de la interfaz de radio para WiMAX móvil y UMB son muy similares a las de LTE presentan en la Tabla 1-4. Los tres sistemas son compatibles con anchos de banda flexibles, FDD/TDD impresión a doble cara, OFDMA en el enlace descendente y esquemas MIMO. Hay algunas diferencias, tales como enlace ascendente de LTE se basa en la SC-FDMA en comparación con OFDMA en Mobile WiMAX y UMB. El rendimiento de los tres sistemas tanto, se espera que sean similares con pequeñas diferencias. Al igual que la iniciativa IMT-2000, la UIT-R Grupo de Trabajo 5D ha señalado los requisitos para los sistemas IMT-Avanzadas. Entre otros, estos requisitos incluyen la media de datos de enlace descendente de las tasas de 100 Mbits/seg la red de área amplia, y de hasta 1Gbit/s para escenarios con acceso local o baja movilidad. A demás, en la Conferencia Mundial de Radio comunicaciones 2007 (WRC-2007), un máximo de un nuevo espectro 428 MHz se identifica para los sistemas IMT, que también incluye un espectro de 136 MHz asignados sobre una base global [8].

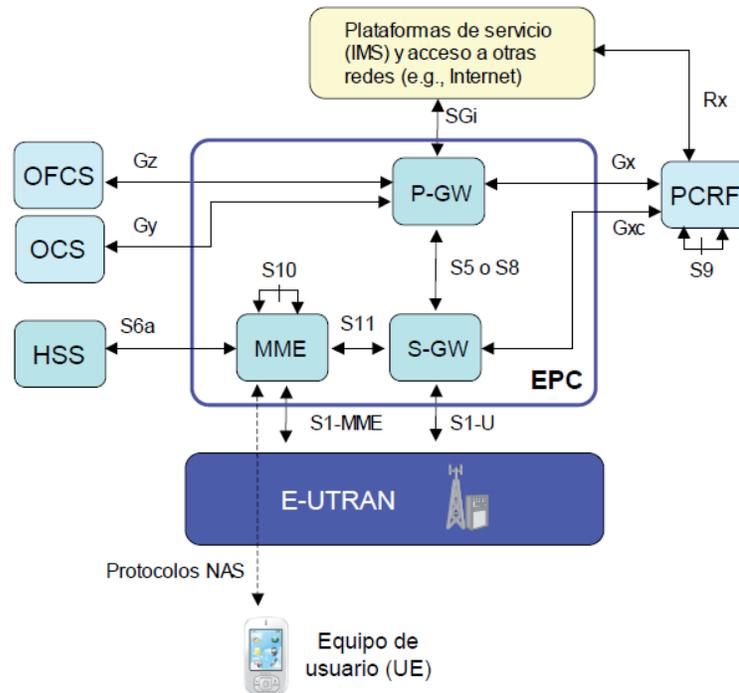
Tabla 1-4. LTE y UMB cumplen con los requisitos de IMT-2000 y por lo tanto ellos también son parte de la familia de normas IMT-2000.

Bandwidth		1.25–20 MHz
Duplexing		FDD, TDD, half-duplex FDD
Mobility		350 km/h
Multiple access	Downlink	OFDMA
	Uplink	SC-FDMA
MIMO	Downlink	$2 \times 2, 4 \times 2, 4 \times 4$
	Uplink	$1 \times 2, 1 \times 4$
Peak data rate in 20 MHz	Downlink	173 and 326 Mb/s for 2×2 and 4×4 MIMO, respectively
	Uplink	86 Mb/s with 1×2 antenna configuration
Modulation		QPSK, 16-QAM and 64-QAM
Channel coding		Turbo code
Other techniques		Channel sensitive scheduling, link adaptation, power control, ICIC and hybrid ARQ

1.9. Red troncal de paquetes evolucionada EPC

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 EUTRAN. 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). La descripción completa de la red troncal EPC se recoge en los documentos 3GPP TS 23.401 y 3GPP TS 23.402. En particular, en la especificación TS 23.401 se cubre la arquitectura de la red troncal EPC cuando la red de acceso es E-UTRAN, así como la utilización de redes de acceso 3GPP alternativas o complementarias como UTRAN y GERAN. Por otro lado, la especificación TS 23.402 extiende la arquitectura de la red troncal EPC para soportar el acceso a través de otras redes no 3GPP. En la Figura 2-16 comprende únicamente las entidades de red que forman el núcleo de la red troncal EPC para la provisión de servicios de conectividad IP a través de una red de acceso E-UTRAN, junto con las entidades de red e interfaces que soportan las funciones relacionadas con el control de del servicio de conectividad (control de QoS) y de los mecanismos de tarificación [8].

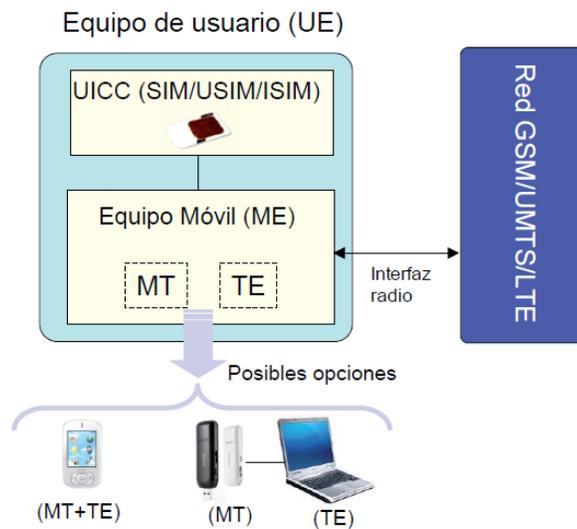
Figura 1-20. Arquitectura básica de la red troncal EPC⁸



1.9.1. Equipo de usuario EU

El equipo de usuario es el equipo que permite a los usuarios del sistema LTE acceder a los servicios de la red LTE a través de la interfaz radio. La arquitectura funcional de un equipo de usuario en el sistema LTE es la misma que en su momento se definió para los sistemas GSM y que se adaptó posteriormente para UMTS. La arquitectura funcional de un equipo de usuario GSM/UMTS/LTE se muestra en la Figura 2-18. El equipo de usuario (*User Equipment*, UE) contiene dos elementos básicos: un módulo de suscripción del usuario (SIM/USIM) y el equipo móvil propiamente dicho (*Mobile Equipment*, ME). Adicionalmente, las funciones del equipo móvil se agrupan en dos entidades funcionales: la terminación móvil (*Mobile Terminal*, MT) y el equipo terminal (*Terminal Equipment*, TE). A continuación describo cada uno de ellos [9].

Figura 1-21. Equipo de Usuario (User Equipment, UE)⁸



El módulo de suscripción de usuario se materializa mediante el uso de una tarjeta inteligente (UICC) que contiene la aplicación que gestiona los datos de suscripción de los usuarios a las redes 3GPP. La aplicación utilizada para acceder a redes GSM se denomina SIM (*Subscriber Identity Module*), mientras que para el acceso a redes UMTS se conoce como UMTS SIM (USIM). Además de las aplicaciones SIM y USIM, la tarjeta UICC puede contener también una aplicación denominada ISIM (*IP Multimedia Services Identity Module*) para almacenar los datos necesarios para la operación de los servicios IMS (Ejemplo, direcciones SIP del usuario). La SIM/USIM está asociada a un usuario y por tanto es quien le identifica en el sistema independientemente del equipo móvil utilizado. La separación entre USIM y ME facilita que un usuario pueda cambiar de terminal manteniendo su identidad. Muchas veces los términos tarjeta inteligente, SIM y USIM se utilizan de forma equivalente. Estrictamente, la tarjeta inteligente únicamente se refiere al circuito integrado y sus capacidades de comunicación y procesamiento (elementos hardware/software). Como entorno de procesamiento que es, una tarjeta inteligente puede ejecutar diferentes aplicaciones, y dos de ellas son la SIM y USIM. Dichas aplicaciones contienen una estructura de datos (Ejemplo, IMSI del usuario, áreas de seguimiento, etc.) y un conjunto de rutinas específicas (Ejemplo, soporte del mecanismo de autenticación). El diseño de estas aplicaciones se

⁸ Tomado de Documento 3GPP TS 27.007, “AT command set for User Equipment (UE)”.

realiza de forma que se garantice compatibilidad con los sistemas previos. Así, una tarjeta con una aplicación USIM, o tarjeta USIM, puede ser utilizada para acceder a una red GSM [10].

En el caso del sistema LTE, se ha mantenido la misma compatibilidad, y además, la aplicación correspondiente sigue denominándose USIM. No obstante, la USIM utilizada para acceder a un sistema LTE, extiende la aplicación USIM de UMTS mediante la inclusión de los parámetros adicionales necesarios para gestionar el acceso a través de LTE (Ejemplo, las nuevas claves de seguridad soportadas en LTE). El equipo móvil (ME) integra las funciones propias de comunicación con la red celular así como las funciones adicionales que permiten la interacción del usuario con los servicios de la red (nótese que un usuario puede ser una persona o bien otro dispositivo electrónico). En este sentido, de cara a introducir un cierto grado de flexibilidad en el diseño del equipo móvil, se ha definido una interfaz que permite que exista una separación física entre el equipo que alberga las funciones propias de la comunicación (MT) y el equipo que se ocupa de la interacción con el usuario (TE), y que puede contener multitud de aplicaciones adicionales no directamente relacionadas con el sistema de comunicaciones móviles. Dicha interfaz consiste en la especificación del conjunto de comandos AT que permiten acceder a los servicios de la red (Ejemplo, establecimiento de una conexión en la red LTE) soportados en el MT desde el (TE) [44]. En cualquier caso, la separación entre TE y MT es opcional y simplemente pretende flexibilizar el desarrollo de equipos de usuario más complejos. Tal como se ilustra en la Figura 2-18, un ejemplo claro de equipo de usuario que explota la interfaz basada en comandos AT es la utilización de un portátil (TE) y un módem GSM/UMTS/LTE (MT) [10].

La complejidad y prestaciones que puede presentar un equipo de usuario LTE se clasifica en un conjunto de categorías definidas por 3GPP. Las categorías, denominadas formalmente como *ue-Category* en las especificaciones del 3GPP, se establecen en función de la capacidad de transmisión del terminal. Así, las categorías tienen en cuenta el grado de soporte de los terminales LTE de mecanismos de multiplexación espacial con múltiples antenas, el uso de determinadas modulaciones, el tamaño en bytes de las colas de transmisión, etc. En particular, en la primera versión del sistema LTE (*Release8*) se han definido 5 categorías de terminal cuyas características se describen en la Tabla 1-5. Además de la categoría del terminal en términos de capacidad de transmisión, un equipo de usuario también admite diferentes implementaciones en base, por ejemplo, a las bandas de frecuencias soportadas y a la integración en el propio terminal de otras tecnologías de acceso radio (Ejemplo, terminales multimodo 3GPP/802.11). La especificación detallada de las diferentes capacidades que pueden contemplarse en los terminales LTE se proporciona en 3GPP TS 36.306 [11].

Tabla 1-5. Parámetros de la capa física del terminal⁹

Categoría	Enlace descendente				Enlace ascendente	
	Número máximo de bits recibidos por TTI	Número máximo de bits transportados por un DL-SCH en un TTI	Máximo número de antenas transmisoras en el caso de multiplexado espacial	Velocidad de pico ³ (Mb/s)	Número máximo de bits recibidos por TTI	Velocidad de pico (Mb/s)
1	10296	10296	1	≅ 10	5160	≅ 5
2	51024	51024	2	≅ 51	25456	≅ 25
3	102048	75376	2	≅ 102	51024	≅ 51
4	150752	75376	2	≅ 150	51024	≅ 51
5	299552	149776	4	≅ 300	75376	≅ 75

Nota: Recuérdese que en el caso de utilizar MIMO en el enlace descendente varios TTI (*Transmission Time Interval*) pueden transmitirse en paralelo.

1.9.2. Gestión de Sesiones

La gestión de sesiones se refiere a la gestión del servicio de conectividad IP que ofrece una red LTE. Este servicio de conectividad IP se articula en base a los conceptos de *conexión PDN* y *servicio portador EPS* que se describen a continuación. El servicio de conectividad IP de una red LTE es capaz de ofrecer diferentes niveles de calidad de servicio (QoS) y puede ser gestionado mediante mecanismos de control de las políticas de uso de la red (*policy control*) que permiten la interacción del servicio de conectividad proporcionado por LTE con las plataformas que sustentan los servicios finales (IMS). Los conceptos, funcionalidades y procedimientos más relevantes asociados a la gestión de sesiones en LTE se abordan a continuación.

1.9.2.1. Servicios de conectividad IP: Conexiones PND

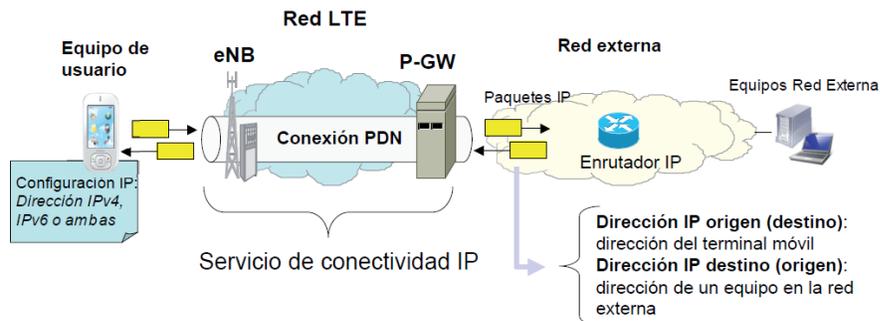
El sistema LTE proporciona a los usuarios un servicio de conectividad IP a una o múltiples redes de paquetes externas. El servicio de conectividad IP permite que un terminal LTE pueda intercambiar información (paquetes IP) con otros equipos de la red IP externa remota como si el terminal LTE se encontrara conectado físicamente a dicha red (el terminal es “visible” en la red remota externa mediante una dirección IP propia que le ha sido asignada a través del sistema LTE). El servicio de conectividad IP proporcionado por LTE entre el equipo de usuario y una red externa IP se denomina “conexión PDN”.

⁹ Tomado de Documento 3GPP TS 32.240, “Telecommunication management; Charging management; Charging architecture and principles”.

Las redes de paquetes externas a las que puede accederse a través de la red LTE pueden ser redes públicas como Internet o bien redes privadas como una intranet corporativa, la red de un proveedor de acceso a Internet (ISP) o bien una red interna del propio operador de la red LTE para la provisión, por ejemplo, de servicios IMS. En las especificaciones del 3GPP, las posibles redes externas de paquetes accesibles desde LTE se denominan, sin distinción alguna, como *Packet Data Networks* (PDNs), y por este motivo se habla de conexión PDN en lugar de simplemente conexión IP. La denominación de PDN es herencia de GPRS donde se acuñó este término. En GPRS, el servicio de conectividad ofrecido contempla la transferencia de otros tipos de paquetes además de IP como, por ejemplo, paquetes PPP (*Point-to-Point Protocol*) o paquetes X.25. Por ello, en GPRS se habla de forma genérica de conexiones PDN, en lugar de conexiones IP, si bien es cierto que el servicio de conectividad IP es el caso predominante en los despliegues actuales de este tipo de redes. A diferencia de GPRS, el sistema LTE únicamente proporciona conexiones a redes IP (LTE no soporta la transmisión de otro tipos de paquetes). No obstante, en las especificaciones del sistema LTE sigue utilizándose el término “conexión PDN” utilizado en GPRS para referirse al servicio de conectividad IP ofrecido por la red [12].

Una conexión PDN en el sistema LTE se caracteriza siempre por una dirección IP única a través de la cual el equipo de usuario opera en la red externa. La dirección IP de una conexión PDN puede ser IPv4, IPv6 o ambas (una conexión puede estar asociada simultáneamente a una dirección IPv4 y a una IPv6). En la Figura 2.19 se ilustra el servicio de conectividad IP (conexión PDN) proporcionado por la red LTE.

Figura 1-22. Servicio de conectividad IP de la red LTE: (conexión PDN)¹⁰



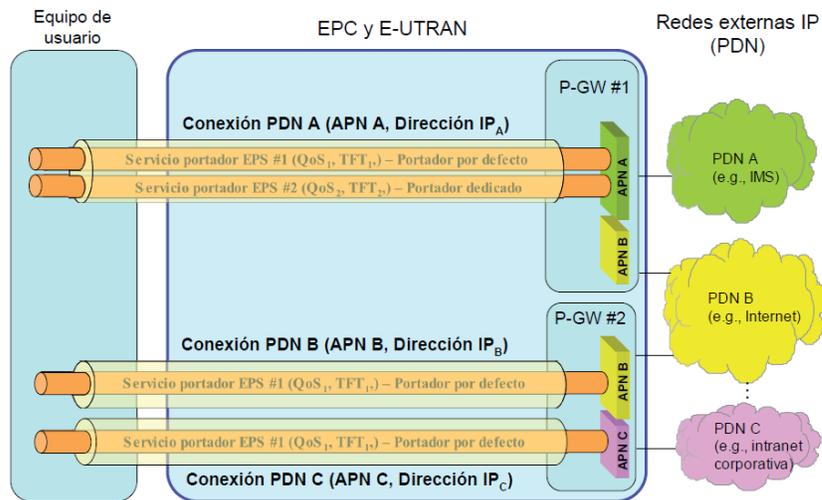
Las redes externas a las que una red LTE puede proporcionar acceso se identifican mediante una etiqueta denominada *Access Point Name* (APN). El APN se compone de un identificador del operador de la red LTE (un código de operador y de país) y un identificador específico de la red externa a la que se proporciona acceso (“servicios-ims”, “internet”, “red-corporativa-1”, etc.). De esta forma, cuando se establece una conexión PDN entre un equipo de usuario y una red externa, la red LTE utiliza el parámetro APN para determinar la pasarela P-GW o pasarelas P-GW de la red LTE que van a participar en la provisión de dicha conexión PDN.

¹⁰ Tomado de documento 3GPP TS 36.133, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for support of radio resource management”.

Un equipo de usuario puede establecer múltiples conexiones PDN simultáneas, a través de la misma o varias pasarelas P-GW de la red LTE. El conjunto de redes externas a las que tiene acceso un determinado usuario LTE se controla a través de su suscripción, donde se indica el conjunto de identificadores APNs autorizados. En LTE, a partir del momento en que un usuario se registra en la red LTE, se establece, como mínimo, una conexión PDN. La red externa a la que proporciona acceso la conexión PDN inicial la puede decidir el propio usuario mediante el envío del correspondiente APN o bien puede utilizarse un valor de APN por defecto que la red LTE guarde en el perfil de suscripción de dicho usuario. Las conexiones PDN adicionales, si cabe, las inicia el equipo de usuario una vez ya está registrado y dispone de una conexión PDN inicial (el registro y el establecimiento de la primera conexión se realiza de forma combinada mediante el procedimiento denominado *Network Attach*). La desconexión de una conexión PDN puede iniciarla tanto la propia red LTE (debido, por ejemplo, a un cambio en la suscripción o a una falta de recursos) como el propio usuario [13].

En la Figura 2-20 se representa un equipo de usuario que tiene establecidas tres conexiones PDN con sendas redes externas. Cada conexión PDN se caracteriza por un identificador APN (que indica a qué red externa se proporciona acceso, y por extensión, desde qué pasarela P-GW) y la dirección IP utilizada por el terminal LTE en dicha red externa. Nótese, por tanto, que un terminal LTE puede tener asignadas múltiples direcciones IP, una para cada conexión PDN establecida.

Figura 1-23. Conexiones PDN y servicios portadores EPS¹¹



En la Figura 2-20, mediante la conexión PDN A, el usuario tiene acceso a servicios proporcionados en una plataforma IMS. Por otro lado, la conexión PDN B proporciona al usuario acceso a Internet. En este ejemplo, el acceso a Internet como red externa se indica mediante el identificador APN B y puede realizarse tanto a través de la pasarela P-GW#1 como de P-GW#2, tal como se ilustra en la Figura 2-20. Cuando existen múltiples pasarelas P-GW que proporcionan acceso a una misma red externa, la elección de la pasarela más apropiada la determinaría la red LTE en base a diferentes aspectos tales como balanceo de cargas, espacio de direcciones utilizado en cada pasarela, diferenciación del servicio

¹¹ Tomado de Documento 3GPP TR 25.913, “Requirements for evolved UTRA and evolved UTRAN”

de acceso a Internet, etc. Finalmente, según la Figura 2-20, el equipo de usuario mantiene una tercera conexión PDN a una red privada que se identifica mediante el APN C y cuyo acceso se logra a través de la pasarela P-GW#2. En caso de que hubiera múltiples conexiones PDN asociadas al mismo APN, estas deberían ser proporcionadas por la misma pasarela. El soporte de múltiples conexiones PDN desde el mismo equipo de usuario es opcional en el sistema LTE. En la Figura 2-20, también puede verse como cada conexión PDN está compuesta por un conjunto de servicios portadores EPS (*EPS bearer services*). El concepto de servicio portador EPS, su estructura interna y su relación con las conexiones PDN, se describen a continuación [13].

El servicio de conectividad IP proporcionado por el sistema LTE es un servicio que soporta calidad de servicio (*Quality of Service, QoS*). Así, el trato que reciben los paquetes IP de una determinada conexión PDN en términos de, por ejemplo, tasa de transferencia en bits/s, retardo de transmisión y tasa de pérdidas de paquetes, puede adaptarse a las necesidades de transmisión de los servicios finales a los que accede el usuario. En este contexto, es importante tener en cuenta que a través del sistema LTE pueden proporcionarse servicios finales de muy diferente índole que no requieren las mismas prestaciones del servicio de transmisión (transmisión de audio y video en tiempo real, servicios de mensajería, etc.). Por tanto, la adaptación de las prestaciones de QoS de las conexiones PDN a las características de los servicios finales permite al sistema LTE proporcionar una buena experiencia de uso a los usuarios a la vez que posibilita una gestión eficiente de los recursos (no se reservan más recursos de transmisión de los estrictamente necesarios para satisfacer los objetivos de calidad de servicio).

Nótese que la configuración del comportamiento de QoS, aparte de ser dependiente del servicio final al que accede un usuario, también puede permitir al operador de la red LTE llevar a cabo unas determinadas estrategias de negocio en base a la diferenciación de usuarios (mediante una subscripción “gold” un usuario puede recibir una tasa de transferencia superior en el acceso a Internet). La forma de gestionar la calidad de servicio en el sistema LTE se estructura en torno a la definición de lo que se denomina servicio portador EPS (*EPS Bearer Service*). Un servicio portador EPS es un servicio de transferencia de paquetes IP que tiene asociados unos parámetros de QoS y la plantilla o filtro de paquetes (denominado como *Traffic Flow Template, TFT*) utilizada para seleccionar el flujo de paquetes IP que debe recibir dicho trato de QoS. En este sentido, el servicio portador EPS constituye la unidad mínima de resolución para la provisión de QoS: todos los paquetes IP que fluyen en la red asociados a un mismo servicio portador EPS reciben el mismo trato de QoS [14].

La transmisión de paquetes IP en las conexiones PDN se articula en base al establecimiento de, como mínimo, un servicio portador EPS, tal como se ilustra en la Figura 2-20. Así, en cada conexión PDN siempre existe un servicio portador EPS por defecto activo por el que se enviaría todo el tráfico IP de usuario sin distinción alguna (señalización SIP y datos de las diferentes aplicaciones en curso). Opcionalmente, en aras a poder proporcionar un trato de QoS específico a un determinado flujo de paquetes IP (paquetes IP correspondientes a una aplicación de videoconferencia) pueden activarse servicios portadores EPS adicionales al portador por defecto, denominados como servicios portadores EPS dedicados. De esta forma, si en una conexión PDN existen servicios portadores EPS dedicados activos, el tráfico seleccionado (mediante el TFT) se envía a través de ellos y el resto se cursa a través del portador EPS por defecto [14].

Los parámetros de QoS del servicio portador por defecto vienen fijados por la subscripción del usuario y, como tal, se encuentran en la información almacenada en la base de datos HSS del sistema LTE. En caso de que el usuario acceda a servicios IMS a través del servicio portador por defecto de una conexión PDN, los valores de QoS utilizados deben ser adecuados para la transferencia de señalización SIP entre el equipo de usuario y los servidores de control de la plataforma IMS. El servicio portador por defecto permanece activado durante la vigencia de la conexión PDN y su desactivación conduce a la terminación de la conexión PDN. En cambio, si se hace uso de servicios portadores EPS dedicados, éstos pueden activarse/modificarse/desactivarse al inicio o bien en el transcurso de una conexión PDN. La existencia de un servicio portador EPS dedicado suele estar vinculada a la existencia de un servicio final que requiere un trato específico de QoS (el establecimiento de un servicio videoconferencia puede conllevar la activación de un servicio portador EPS dedicado con valores de QoS adecuados para la transmisión de los paquetes de voz durante el tiempo que dure el servicio). Es importante destacar que todos los servicios portadores EPS de una misma conexión PDN comparten los mismos parámetros de conectividad IP (misma dirección IP). Tal como puede observarse en el ejemplo de Figura 2-20, en las tres conexiones PDN existe un servicio portador EPS por defecto y, en este ejemplo, únicamente en la conexión PDN A, hay activado un servicio portador EPS dedicado [14].

Por tanto, en las conexiones PDN B y C, todo el tráfico recibe el mismo trato de QoS (el del servicio portador por defecto) mientras que en la conexión PDN A se aplican dos tratos de QoS diferentes (uno al servicio de videoconferencia y otro al resto de paquetes).

1.9.2.2. Servicio de portador EPS

El servicio de conectividad IP proporcionado por el sistema LTE es un servicio que soporta calidad de servicio (*Quality of Service*, QoS). Así, el trato que reciben los paquetes IP de una determinada conexión PDN en términos de, por ejemplo, tasa de transferencia en bits/s, retardo de transmisión y tasa de pérdidas de paquetes, puede adaptarse a las necesidades de transmisión de los servicios finales a los que accede el usuario. En este contexto, es importante tener en cuenta que a través del sistema LTE pueden proporcionarse servicios finales de muy diferente índole que no requieren las mismas prestaciones del servicio de transmisión (transmisión de audio y video en tiempo real, servicios de mensajería, etc.). Por tanto, la adaptación de las prestaciones de QoS de las conexiones PDN a las características de los servicios finales permite al sistema LTE proporcionar una buena experiencia de uso a los usuarios a la vez que posibilita una gestión eficiente de los recursos (no se reservan más recursos de transmisión de los estrictamente necesarios para satisfacer los objetivos de calidad de servicio). La configuración del comportamiento de QoS, aparte de ser dependiente del servicio final al que accede un usuario, también puede permitir al operador de la red LTE llevar a cabo unas determinadas estrategias de negocio en base a la diferenciación de usuarios (mediante una subscripción “gold” un usuario puede recibir una tasa de transferencia superior en el acceso a Internet) [14].

La forma de gestionar la calidad de servicio en el sistema LTE se estructura en torno a la definición de lo que se denomina servicio portador EPS (*EPS Bearer Service*). Un servicio portador EPS es un servicio de transferencia de paquetes IP que tiene asociados unos parámetros de QoS y la plantilla o filtro de paquetes (denominado como *Traffic Flow Template*, TFT) utilizada para seleccionar el flujo de paquetes IP que debe recibir dicho trato de QoS. En este sentido, el servicio portador EPS constituye la unidad mínima de resolución para la provisión de QoS: todos los paquetes IP que fluyen en la red asociados a un mismo servicio portador EPS reciben el mismo trato de QoS [14].

1.9.2.3. Modelo de QoS

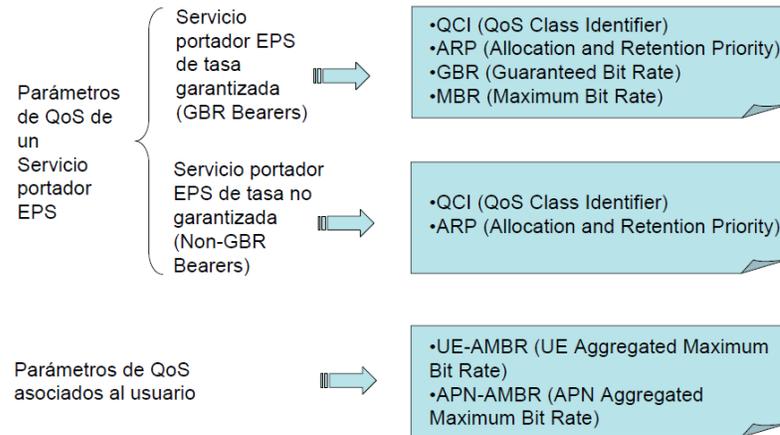
El modelo de QoS “delimita” el comportamiento esperable del servicio de conectividad proporcionado por una red de transmisión de paquetes. La concreción del comportamiento esperable se materializa mediante la especificación de un conjunto de parámetros de QoS asociados a la obtención de unas determinadas prestaciones en términos de, por ejemplo, tasa (bits/s), retardos de transferencia y tasa de pérdida de paquetes. La forma de “delimitar” el comportamiento admite diferentes grados de determinismo que condicionan el tipo de mecanismos necesarios para poder aplicar el modelo de QoS. A modo de ejemplo, en redes IP basadas en una arquitectura de QoS Diffserv, el modelo de QoS se plantea en base a conseguir diferenciar tráfico (priorizar el envío de unos paquetes frente a otros) y no se contempla el poder establecer una cota de retardo máximo [15].

Esto hace que la implementación del modelo Diffserv sea relativamente sencilla y escalable. En cambio, en una arquitectura de QoS IntServ, el modelo de QoS permite especificar una cota máxima del retardo de transferencia entre dos nodos de una red IP. La materialización de dicha cota conlleva la necesidad de reservar recursos de transmisión en cada uno de los nodos de la red, por lo que la aplicación de dicho modelo tiene problemas de escalabilidad. Un modelo de QoS también determina el grado de flexibilidad que ofrece un sistema para gestionar la capacidad de transmisión disponible. Está claro que, en redes como LTE, planteamientos de sobredimensionado de la capacidad de transmisión de la red no son viables económicamente (el espectro es limitado y el coste de la infraestructura de red muy elevado). Por tanto, la porción de capacidad de transmisión asignada a un determinado servicio portador debe establecerse en base a las prestaciones mínimas exigibles para garantizar una buena experiencia de uso del servicio final [15].

El comportamiento esperable en términos de prestaciones de QoS de un servicio portador EPS depende del tipo de servicio final que se curse a través de dicho servicio portador. A modo de ejemplo, el comportamiento de QoS exigible será completamente diferente en caso de cursar un servicio de VoIP o un servicio de navegación HTTP. Asimismo, la cantidad de recursos de transmisión y la operativa de asignación dinámica de los mismos también serán completamente diferentes en ambos casos. Adicionalmente, los parámetros de QoS exigibles al servicio portador pueden también fijarse en función del tipo de usuario. De esta forma, el soporte de QoS puede explotarse también para diferenciar entre usuarios en función, por ejemplo, de las condiciones suscritas en la contratación del servicio. Bajo esta perspectiva, para un mismo servicio, el operador de la red LTE puede ofrecer un comportamiento del sistema diferente para, por ejemplo, usuarios de negocios frente a usuarios convencionales, usuarios de contrato frente a usuarios pre-pago, usuarios privilegiados en situaciones de emergencia (policía, bomberos), etc.

En LTE, el modelo de QoS utilizado para definir el comportamiento de un servicio portador EPS se basa en la especificación de un máximo de cuatro parámetros. Además de estos cuatro parámetros, el modelo de QoS se complementa con dos parámetros adicionales asociados a la suscripción de un usuario. En la Figura 2-21 se esquematiza el conjunto completo de parámetros de QoS considerado en el sistema LTE.

Figura 1-24. Parámetros de QoS en el sistema LTE¹²



Cada servicio portador EPS siempre tiene asociados como mínimo dos parámetros: QCI (*QoSClass Identifier*) y ARP (*Allocation and Retention Priority*). De forma general, el parámetro QCI determina el comportamiento del plano de usuario del servicio portador EPS mientras que el parámetro ARP aplica a la operativa del plano de control. Adicionalmente, algunos servicios portadores denominados como servicios de tasa garantizada (*GBR Bearers*) especifican también un parámetro de tasa media garantizada (GBR) y otro de tasa máxima permitida (MBR). A continuación se describe más detalladamente el significado de dichos parámetros [15].

El QCI es un parámetro que representa una determinada clase de servicio o comportamiento de la red. El valor del QCI no indica de forma directa ninguna magnitud relacionada con las prestaciones de la red sino que simplemente se concibe como un puntero a una determinada clase de servicio. De esta forma, la selección de un valor de QCI para un servicio portador EPS implica la utilización de una serie de parámetros específicos en cada uno de los nodos que procesan el plano de usuario (pesos del *scheduling*, umbrales del control de admisión, configuración de los parámetros de capa de enlace y capa física, etc.). Dichos parámetros podrían haber sido pre-configurados en el equipo por el fabricante en cuestión no bien por el propio operador de la red. Dada la gran flexibilidad que ofrece este esquema, 3GPP ha especificado el comportamiento esperable para un conjunto de QCIs de forma que pueda utilizarse como guía en la configuración de los mecanismos que afectan a la QoS en cada nodo. La finalidad última en la estandarización de un conjunto de QCIs es la de facilitar la consecución de un determinado comportamiento en redes con equipos de diferentes fabricantes así como en escenarios de itinerancia [15].

Los QCIs estandarizados se proporcionan en términos de tipo de servicio portador, retardo, tasa de pérdida de paquetes en situaciones de no congestión y un nivel de prioridad. A modo de ejemplo, en la Tabla 1-6 se proporcionan los detalles de algunos de los valores de QCI estandarizados. Los valores de QCI estandarizados son aplicables cualquiera que sea la red de acceso.

¹² Tomado de documento 3GPP TS 23.107, “Quality of Service (QoS) concept and architecture”.

Tabla 1-6. Valores de QCI estandarizados¹³

QCI	Tipo de recurso	Prioridad ¹⁾	R e t a r d o Paquete ²⁾	Tasa de pérdida de paquetes ³⁾	Ejemplo de servicio
1	GBR	2	100ms	10 ⁻²	Voz
2	GBR	4	150ms	10 ⁻³	Videoconferencia
5	Non-GBR	1	100ms	10 ⁻⁶	Señalización IMS
6	Non-GBR	6	300ms	10 ⁻⁶	Videostreaming

1. El valor de prioridad puede ser utilizado por el *scheduler* para ordenar la asignación de recursos entre un conjunto de servicios portadores radio en condiciones tales que, por ejemplo, exista congestión y no se pueda satisfacer el retardo objetivo fijado en ninguno de dichos servicios portadores.
2. Parámetro que se utiliza para determinar el comportamiento del *scheduler* así como la configuración de la capa de enlace (punto de operación de los mecanismos de retransmisión). El parámetro se plantea como una cota de retardo máximo que deben satisfacer el 98% de los paquetes.
3. La tasa de pérdidas se utiliza fundamentalmente para determinar la configuración de la capa de enlace (punto de operación de los mecanismos de retransmisión RLC y H-ARQ de E-UTRAN). El parámetro representa una cota de la tasa de pérdidas que no son debidas a congestión.

1.9.2.4. Control de servicio de conectividad: Sistema PCC

3GPP ha especificado un subsistema que permite controlar el servicio de conectividad IP ofrecido por la red LTE. Dicho subsistema de control recibe el nombre de PCC (*Policy and Charging Control*) y está concebido para cubrir dos funciones básicas:

- Control mediante políticas de uso (*policy control*) de los servicios portadores EPS. En particular, el control mediante políticas de uso gestionado desde el sistema PCC se centra en dos aspectos concretos: control de los parámetros de *QoS* del servicio portador EPS (denominado como *QoS control* en las especificaciones 3GPP) y control de paso del tráfico a través de la pasarela P-GW (denominado como *gating control* en las especificaciones). Ambos aspectos se desarrollan en detalle más adelante.
- Control de la tarificación del servicio de conectividad, incluyendo el control de servicios pre-pago que requieren un sistema de verificación de crédito *on-line*.

A través del subsistema PCC se articula la interacción del servicio de conectividad proporcionado por LTE con las plataformas que sustentan los servicios finales (IMS). De esta forma, los servicios portadores EPS que se establezcan en la red LTE están en consonancia con las necesidades de transmisión de los servicios finales cuya señalización se lleva a cabo de forma transparente a través de la red LTE. La determinación de las necesidades de QoS a través del sistema PCC hace que no sea

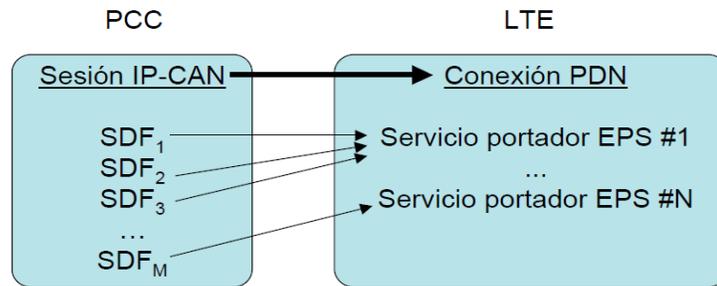
¹³ Tomado de documento 3GPP TR 25.913, "Requirements for evolved UTRA and evolved UTRAN".

necesario que sea el terminal quien comunique a la red el trato de QoS que espera recibir de ella. Este planteamiento es opuesto al que fue adoptado inicialmente en GPRS donde las características de QoS de los servicios portadores (contextos PDP) se señalizan desde el equipo de usuario en el momento de su activación. Esta opción se conoce como modelo de QoS iniciado por el móvil y conlleva la necesidad de que en el terminal exista una API (*Application Program Interface*) a través de la cual las aplicaciones puedan solicitar QoS. En cambio, el modelo de QoS propiciado por el subsistema PCC se conoce como modelo de QoS iniciado por la red de forma que, a través de mecanismos de la propia red, ésta puede conocer las necesidades de QoS de las aplicaciones y establecer los servicios portadores adecuados. La posibilidad de activar servicios portadores desde la red con los parámetros de QoS apropiados (y controlados por el operador) fue una de las mejoras introducidas en las últimas versiones del servicio GPRS en redes UMTS y se ha convertido en el modelo fundamental utilizado en la red LTE [15].

El subsistema PCC no es específico de la red LTE sino que constituye un subsistema de control transversal que permite gestionar también el servicio de conectividad IP ofrecido por otros tipos de redes de acceso. Por este motivo, en las especificaciones del subsistema PCC se habla de forma genérica de redes IP-CAN (*IP Connectivity Access Network*). Ejemplos de redes IP-CAN son las redes troncales EPC y GPRS, junto con las diferentes redes de acceso radio que admiten. Además, la arquitectura PCC contempla que una determinada red IP-CAN soporte diferentes tecnologías de acceso cuyas características pueden ser tenidas en cuenta a la hora de gestionar las sesiones. En el caso concreto de la red troncal EPC, la red de acceso puede ser E-UTRAN o cualquiera de las otras redes de acceso 3GPP y no 3GPP soportadas, de forma que el subsistema PCC dispone de mecanismos para conocer la red de acceso en uso y puede actuar en consecuencia (no autorizar el establecimiento de la componente de video de un servicio IMS cuando el terminal no se encuentre en E-UTRAN).

Dada su transversalidad, el subsistema PCC denomina sesión IP-CAN a la asociación formada por una dirección IP, una identidad de usuario (si está disponible) y un identificador de red PDN (APN). En el caso de la red LTE el concepto de sesión IP-CAN es equivalente al de conexión PDN comentado en el apartado 3.2.1. Asimismo, el tráfico que fluye asociado a una misma sesión IP-CAN, el subsistema PCC puede disociarlo en múltiples flujos de paquetes IP, denominados como *Service Data Flows* (SDFs). Un SDF constituye la unidad mínima de agregación de tráfico sobre la que se aplican las políticas de uso y tarificación del sistema PCC. A diferencia de la asociación directa que existe entre sesión IP-CAN y conexión PDN en una red LTE, es importante matizar que no existe una correspondencia directa entre los SDFs de una sesión IP-CAN y los servicios portadores EPS de la conexión PDN, sino que, cada servicio portador EPS puede transportar uno o múltiples SDFs (SDFs que tengan la misma QoS pueden transportarse en un único servicio portador EPS). En la Figura 2-22 se ilustra la relación entre los conceptos IP-CAN, SDF, conexión PDN y servicios portadores EPS [15].

Figura 1-25. Relación entre los conceptos IP-CAN y flujos SDF utilizados en el subsistema PCC con los componentes del servicio de conectividad IP de la red LTE.¹⁴



1.9.2.5. Procedimiento de gestión de sesiones

En el sistema LTE la activación/modificación/desactivación de los servicios portadores EPS se controla desde la propia red en base a los datos de suscripción del usuario y/o a las políticas de uso recibidas desde el sistema PCC. Es importante recalcar que este planteamiento es diferente al seguido en el servicio GPRS de redes UMTS donde la activación de los servicios portadores la inicia el terminal. Los procedimientos principales relacionados con la gestión de sesiones son:

- Procedimiento de registro (*Network Attach*). A través de este procedimiento se establece el servicio de conectividad IP que ofrece la red LTE. Existen diferentes variantes del procedimiento de registro en función de si la red de acceso utilizada es E-UTRAN o cualquiera de las otras redes de acceso alternativas 3GPP y no 3GPP contempladas.
- Procedimiento de petición de servicio (*Service Request*). El modelo de servicio ofrecido por la red LTE permite que un usuario en modo *idle* (i.e. sin una conexión a E-UTRAN) mantenga abiertos los servicios portadores EPS en la red troncal. Este procedimiento permite una re-activación rápida del plano de usuario cuando el terminal pasa de *idle* a conectado.
- Petición de conexión PDN solicitada por el terminal (*UE Requested PDN Connectivity*). El sistema LTE permite el equipo de usuario inicie el procedimiento de establecer una conexión PDN adicional a la conexión PDN establecida en el procedimiento de registro.
- Activación, modificación y desactivación de los servicios portadores EPS dedicados (*EPS Bearer Activation/Modification/Deactivation*). La gestión de los servicios portadores EPS dedicados es uno de los pilares de la gestión de sesiones en la red LTE. La activación y modificación de estos servicios puede estar vinculada al control dinámico de QoS ofrecido por el subsistema PCC.
- Modificación del servicio portador solicitada por el terminal (*UE requested bearer resource modification*). Este procedimiento permite que el terminal pueda solicitar cambios en los servicios portadores que le ofrece la red. Los cambios pueden ser tanto un cambio de los parámetros de QoS como una modificación de los filtros de paquetes que determina la composición del tráfico agregado en un servicio portador. El procedimiento constituye una vía de escape al modelo general de activación de servicios portadores donde, tal como se ha comentado al principio de este apartado,

¹⁴ Tomado de documento 3GPP TS 23.122, “Non-Access-Stratum (NAS) functions related to Mobile Station (MS) in idle mode”.

es la red quien controla su activación y determina sus características. Si la solicitud de modificación realizada por un terminal es aceptada por la red, ésta procede a iniciar los mecanismos pertinentes de activación, modificación y/o desactivación de los servicios portadores EPS (el control sigue teniéndolo la red, pero en este caso, atendiendo a una petición proveniente del terminal) [15].

1.9.3. Gestión de movilidad

La gestión de movilidad se refiere a los mecanismos con los que cuenta el sistema LTE para que los usuarios puedan acceder y recibir servicios desde cualquier ubicación geográfica donde el sistema disponga de cobertura. Asimismo, la gestión de movilidad también abarca los mecanismos utilizados en el sistema LTE para poder mantener las conexiones de sus usuarios activas aun cuando éstos puedan cambiar de estación base debido a su movilidad (mecanismos de *handover*).

1.9.3.1. Marco de gestión de movilidad

El sistema LTE especifica un modelo de movilidad (denominado modelo EMM, *EPS Mobility Management*) con dos posibles estados que representan dos situaciones de accesibilidad en las que puede encontrarse un usuario del sistema. Los dos estados del modelo EMM son 4:

- Estado “No registrado” (*EMM-Deregistered*). En este estado, el usuario no se encuentra visible en el sistema LTE, y por tanto, no tiene acceso a los servicios del sistema. En este estado, el sistema LTE no dispone de ninguna información relativa a la localización del usuario. La situación más habitual que conlleva que un usuario se encuentre en este estado es que el terminal LTE está apagado.
- Estado “Registrado” (*EMM-Registered*). En este estado, el usuario está operativo en el sistema LTE, y por tanto, tiene acceso a sus servicios a través de un equipo de usuario. En este estado, la red dispone de información de localización del equipo de usuario con la resolución de, al menos, una lista de áreas de seguimiento (*Tracking Arealist*). Asimismo, en este estado el equipo de usuario mantiene, al menos, una conexión PDN activa y tiene asignado un nodo MME de la red troncal encargado de realizar su seguimiento.

La conmutación entre ambos estados de movilidad se realiza a través de procedimientos de “registro” y “cancelación de registro”. El procedimiento de registro, conlleva el paso de un estado “No registrado” a un estado “Registrado” y siempre es un procedimiento iniciado por el terminal. El procedimiento de “cancelación de registro” (*Network Detach*) sirve para realizar el paso contrario y puede ser iniciado tanto por el terminal (en el proceso de apagado del terminal) como por la propia red (cambios en la suscripción de un usuario). La conmutación de un estado “Registrado” a “No registrado” también puede acontecer debido a otros motivos tales como el rechazo de la red al registro de un terminal en una determinada área de localización o bien el hecho de que, pasado un cierto tiempo, no se haya recibido ninguna actualización por parte del terminal (la red puede forzar a que los equipos realicen actualizaciones periódicas de su localización aun cuando no junto con los estados de movilidad EMM, el sistema LTE también define un modelo de estados para indicar la existencia o no de un plano de control activo entre el equipo de usuario y el nodo MME de la red troncal donde se encuentra registrado. Dicho modelo de estados se denomina modelo ECM (*EPS Connection Management*) y se estructura también en dos posibles estados [15]:

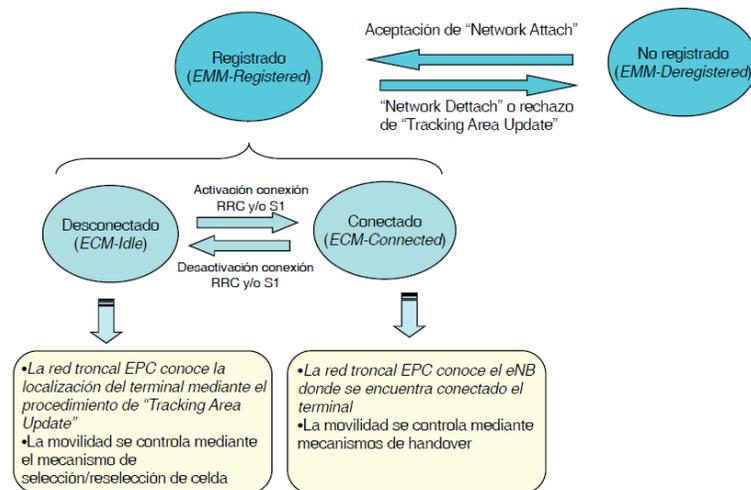
- Estado “Desconectado” (*ECM-Idle*). En este estado, el terminal no tiene establecida una conexión de señalización con ninguna entidad MME. La existencia de este estado responde básicamente a la

necesidad de disponer de un modo de operación de bajo consumo que permita conseguir un modelo de funcionamiento “*Always-on*” mediante la posibilidad de conmutar de forma rápida entre este estado y el siguiente estado “Conectado” en el que el terminal podría enviar/recibir datos.

- Estado “Conectado” (*ECM-Connected*). En este estado, el equipo de usuario tiene establecida una conexión de señalización con una entidad MME de la EPC. Dicha conexión de señalización se compone de una conexión RRC en E-UTRAN y de una conexión a través de la interfaz S1-MME entre la red de acceso E-UTRAN y la entidad de la red troncal MME. El envío/recepción de datos de usuario siempre se realiza en este estado.

La información relativa a los estados EMM y ECM de un usuario se almacena en el equipo de usuario y en la red troncal EPC, en particular en el nodo MME que da servicio a dicho equipo terminal. En el caso del terminal, los estados *ECM-Idle* y *ECM-Connected* se mapean directamente a los estados *RRC_IDLE* y *RRC_CONNECTED* empleados por la capa RRC del plano de control entre el terminal y E-UTRAN. En el caso del nodo MME, el estado *ECM-Connected* se vincula a la existencia de una conexión de señalización en la interfaz S1-MME asociada al usuario entre el MME y el eNB correspondiente [15].

Figura 1-26. Modelo de estados para la gestión de movilidad y de la conexión a EPC¹⁵



1.9.3.2. Gestión de la localización

La red debe disponer de mecanismos para conocer con un determinado nivel de resolución la localización de los terminales que se encuentren registrados (estado *EMM-Registered*) pero que no tengan establecida una conexión con ninguna estación base (estado *ECM-Idle*).

LTE define el concepto de Área de Seguimiento (*Tracking Area, TA*) para gestionar la información de localización. Un TA agrupa a un conjunto de eNBs de forma que la información de localización disponible en la red troncal EPC de un determinado equipo de usuario solamente se conoce en base a la resolución proporcionada por tales agrupaciones. La identidad de un TA se denomina TAI (*Tracking*

¹⁵ Tomado del documento 3GPP 36.304, "User Equipment (UE) Procedures in Idle Mode".

Area Identifier) y se difunde a través de los mensajes de información de sistema enviados en los canales de *broadcast* de los eNBs que integran una TA. Un eNB sólo puede pertenecer a una TA de una red troncal EPC, es decir, no hay solapes entre diferentes TAs. El equipo de usuario, a partir del identificador TAI recibido, es el encargado de comunicar a la red en qué TA se encuentra accesible mediante los mecanismos de *Network Attach* y de *Tracking Area Update*. De esta forma, cuando la red necesita contactar con el terminal, el mensaje de aviso (*paging*) se difunde a través de todas las estaciones base que integran el TA en que se encuentra localizado el terminal [16].

La selección de qué estaciones base integran cada una de las TAs es un aspecto de ingeniería que plantea un compromiso entre la carga de señalización que originan los mecanismos de TAU y la carga asociada al procedimiento de aviso de los equipos de usuario: si las TAs están formadas por pocos eNBs, el número de accesos a la red por parte de los terminales para actualizar su localización aumenta. Un elevado número de accesos repercute tanto en la carga de la red como en el consumo de baterías de los equipos de usuario. En cambio, cuando la red debe avisar a un equipo de usuario, el procedimiento de *paging* puede ser más selectivo ya que afecta a pocas celdas.

La gestión de la localización mediante áreas de seguimiento es un planteamiento ya utilizado en redes anteriores como UMTS y GSM. En particular, en dichas redes, la localización de terminales registrados en el dominio de circuitos se realiza mediante el concepto de área de localización (*Location Area, LA*) y mediante la definición de áreas de rutado (*Routing Area, RA*) en el dominio de paquetes. Al igual que las TA de LTE, las agrupaciones LA y RA tampoco presentan solape y su determinación plantea los mismos compromisos esgrimidos anteriormente [16].

Sin embargo, una modificación importante que introduce LTE es la posibilidad de que un terminal se encuentre registrado en múltiples TAs a la vez, es decir, en una lista de TAs. Esta modificación responde a la necesidad de disponer de mecanismos que ayuden a minimizar la señalización debida a las actualizaciones de localización en las zonas limítrofes entre TAs. En estas zonas, determinados patrones de movilidad de los equipos de usuario, podrían originar un número de TAUs elevado si el terminal va conmutando sucesivamente entre eNBs de diferentes TAs. Para ello, mediante el registro a múltiples TAs, el equipo terminal únicamente actualiza su localización en el caso de que se mueva fuera de la cobertura del grupo de TAs que integra la lista, con la excepción de la actualización periódica de TA. El conjunto de TAs que integran la lista lo controla la red y lo comunica al terminal mediante el procedimiento de actualización de TA (cuando el terminal se registra en una determinada TA, la red le envía la lista de TAs en las que mantiene un registro para el terminal). Nótese que, mediante una gestión apropiada de la lista de TAs por terminal, la red LTE puede confeccionar de forma dinámica áreas de localización “personalizadas” que conduzcan a una reducción de la señalización asociada a los procedimientos de TAU y *Paging* [16].

Es importante destacar que el marco de gestión de movilidad en LTE ha sufrido importantes simplificaciones respecto a la solución de movilidad de UMTS donde la red de acceso UTRAN también participa en la gestión de la localización mediante la definición de áreas de rutado propias (UTRAN Routing Areas, URAs) y de un conjunto de estados asociados a la gestión de movilidad en la capa RRC (cell-FACH, URA-PCH, etc.). En cambio, en el sistema LTE, la gestión de localización se sustenta íntegramente en la red troncal EPC.

1.9.3.3. Mecanismo de Handover

El mecanismo de *handover* se utiliza para gestionar la movilidad de los equipos de usuario que se encuentran en modo activo (*ECM-Connected*). Conceptualmente, el *handover* es un mecanismo que permite que las conexiones que tengan establecidas los equipos de usuario “sobrevivan” al cambio de estación base que proporciona el acceso a la red. Desde la perspectiva del servicio ofrecido al usuario,

los requisitos de diseño de un mecanismo de preparación y ejecución del *handover* se plantean en términos del tiempo de interrupción o tasa de pérdida de datos que puede aparecer durante la ejecución del cambio. En este sentido, en los requerimientos de diseño del sistema LTE, se establece que la degradación de prestaciones en la que puede incurrirse durante la realización de un *handover* debe ser menor o igual a la existente en redes de circuitos GSM. Asimismo, entre los requerimientos de velocidades físicas de los terminales, se apuntan velocidades de hasta 350 km/h, aunque se indica que la red esté realmente optimizada para trabajar en el rango 0-15 km/h. Todas estos requerimientos hacen que el diseño del mecanismo de *handover* en LTE constituya un elemento clave del sistema [17].

Para la consecución de tales requisitos, la implementación del mecanismo de *handover* en LTE se sustenta en los siguientes principios básicos:

- El mecanismo de *handover* especificado en LTE se controla desde la red (la red decide el cambio de estación base) teniendo en cuenta medidas enviadas desde los equipos de usuario (*handover* controlado por la red y asistido por el terminal). Concretamente, la decisión de llevar a cabo un cambio de eNB de un terminal en modo conectado, la toma el propio eNB con el que el equipo de usuario mantiene una conexión RRC activa. (criterios y algoritmos de decisión), atendiendo a que la función que controla las decisiones de *handover* constituye una de las funciones clave para la gestión eficiente de los recursos radio en E-UTRAN.
- Una vez tomada la decisión sobre la necesidad de realizar un *handover*, la propia red se encarga de reservar los recursos necesarios en el eNB destino en aras a reducir el tiempo de interrupción (durante este tiempo de preparación el terminal sigue conectado al eNB antiguo) así como el número de intentos de *handover* fallidos. Una vez la red garantiza que el terminal puede ser traspasado al nuevo eNB, la red ordena al terminal que ejecute el cambio. Este planteamiento se conoce popularmente como *Make Before Break*, en contraposición a otro planteamiento denominado *Break Before Make* donde el terminal realizaría el cambio de eNB sin haberse efectuado ninguna reserva de recursos en el eNB destino.
- Durante la realización del proceso de *handover*, la propia red dispone de mecanismos para transferir los paquetes del usuario pendientes de transmisión en el viejo eNB hacia el eNB destino (mediante la utilización de la interfaz X2). Este planteamiento permite reducir el número de paquetes perdidos durante la ejecución de un *handover*. Nótese por ejemplo que, a diferencia de la red de acceso UTRAN basada en CDMA, el *handover* en E-UTRAN siempre es del tipo “*hard-handover*” (en contraposición al denominado “*soft-handover*” característico de sistemas CDMA). Un “*hard-handover*” significa que existe un tiempo de interrupción del servicio durante el cambio de estación base necesario para adquirir la sincronización en la nueva base y obtener la primera asignación de recursos en ella (en sistemas CDMA, no se produce dicho tiempo de interrupción). En el momento en que un terminal conmuta entre estaciones base, todavía pueden seguir llegando paquetes IP a la estación base antigua dado que el rutado en la infraestructura de la red todavía puede no haberse actualizado.

Sobre estas premisas, la realización de un *handover*-intra-LTE puede dar respuesta a diferentes escenarios de movilidad tales como:

- *Handover* entre eNBs conectados mediante una interfaz X2. La existencia de esta interfaz permite establecer un plano de usuario entre eNBs para el envío de datos durante el proceso de *handover*. Además, a través de X2, la señalización del procedimiento así como la transferencia del contexto de datos asociado al equipo terminal puede llevarse a cabo directamente entre eNBs, sin pasar por el nodo MME de la red troncal.

- *Handover* entre eNBs que no disponen de la interfaz X2. En este caso, no es posible el envío de paquetes de usuario entre eNBs y la señalización de *handover* debe articularse necesariamente a través de la entidad MME.
- *Handover* entre eNBs, soporten o no soporten la interfaz X2, que requiera la reubicación de alguno de los nodos de la troncal EPC. En este caso, el cambio de eNB podría conllevar el cambio de la pasarela S-GW a través de la cual está establecido el plano de usuario o bien del nodo MME que termina el plano de control con el equipo de usuario. El caso más complejo sería el de un *handover* donde se cambiaran ambos, S-GW y MME.

Es importante destacar que el mecanismo de *handover* no considera en ningún caso el cambio de la pasarela P-GW que se mantiene como el punto de conexión a la red externa durante toda la vigencia de la conexión PDN.

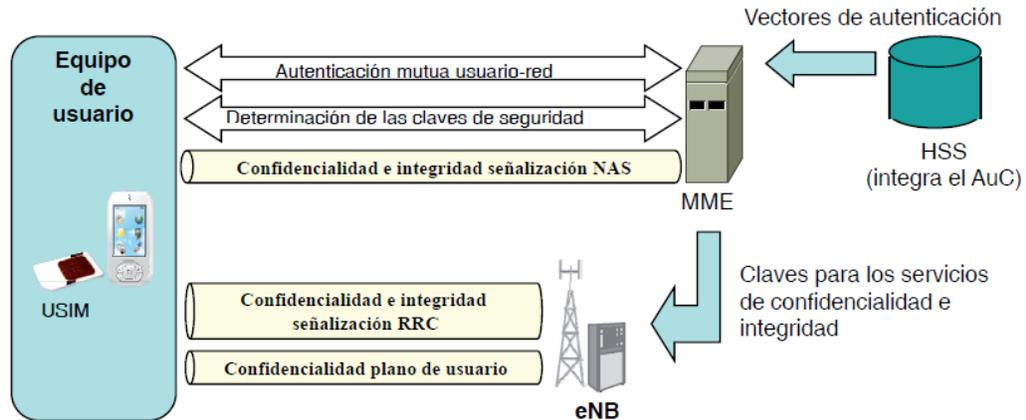
1.9.4. Marco general de seguridad

La gestión de seguridad concierne a cómo la red LTE autentica y autoriza el uso de sus servicios a los usuarios así como cuáles son los mecanismos utilizados para proporcionar confidencialidad e integridad de la información enviada tanto en la interfaz radio como en otras interfaces entre equipos de red. Los componentes y procedimientos básicos de la gestión de seguridad en LTE se tratan a continuación.

1.9.4.1. Seguridad de acceso a la red

La seguridad de acceso a la red LTE a través de una red de acceso E-UTRAN se compone de los siguientes elementos (Figura 2-24):

- Mecanismos para la autenticación mutua entre el usuario y la red. El procedimiento a través del cual se realiza la autenticación mutua, junto con la gestión de claves, se denomina EPS *Authentication and Key Agreement (AKA)*.
- Mecanismos para la determinación de las claves secretas utilizadas en los algoritmos de cifrado para la provisión de los diferentes servicios de confidencialidad e integridad.
- Servicios de confidencialidad e integridad para la transferencia de la señalización NAS entre el equipo de usuario y la entidad MME de la red troncal EPC.
- Servicios de confidencialidad e integridad para la transferencia de la señalización del protocolo RRC entre el equipo de usuario y el eNB (el cifrado se realiza en la capa PDCP de la torre de protocolos radio).
- Servicios de confidencialidad para la transferencia de información en el plano de usuario entre el equipo de usuario y el eNB (el cifrado se realiza en la capa PDCP de la torre de protocolos radio). Nótese que la información del usuario no dispone de un servicio de integridad ya que, en caso de ser necesario, se considera un aspecto dependiente del servicio final en cuestión.

Figura 1-27. Componentes de la seguridad de acceso a la red¹⁶

Las claves de cifrado y los diferentes parámetros (*checksums* de seguridad) utilizados en los mecanismos y servicios de seguridad tienen un origen común: una clave secreta K asociada a un usuario que se almacena en (1) la tarjeta USIM, y (2) en la entidad funcional denominada *Authentication Center* (AuC) que forma parte del HSS. A partir de la clave K se derivan todas las claves y parámetros utilizados en las funciones de seguridad. En la infraestructura de red, la clave K nunca sale del HSS. En su lugar, el HSS genera los denominados vectores de autenticación. Los vectores de autenticación son la información de seguridad que reciben las entidades MME de cara a sustentar los diferentes procedimientos de seguridad (EPA AKA), tal como se ilustra en la Figura 2-24 El vector de autenticación utilizado en el sistema LTE se compone de cuatro parámetros [18]:

- RAND: Número aleatorio que se utiliza en la generación del resto de parámetros del vector.
- XRES: Resultado esperado utilizado en la autenticación del usuario por parte de la red en el mecanismo EPS AKA.
- AUTN: Parámetro utilizado para que la USIM del usuario pueda autenticar a la red en el mecanismo EPS AKA.
- K_{ASME} : Clave de seguridad intermedia utilizada en el sistema LTE para la obtención del conjunto de claves utilizadas en los diferentes servicios de confidencialidad e integridad. Esta clave se deriva de unas claves denominadas CK (*Ciphering Key*) e IK (*Integrity Key*) que son las utilizadas en UMTS. Por este motivo, a partir de un vector de autenticación válido en LTE puede derivarse un vector para UMTS (cinco parámetros en lugar de cuatro) y viceversa.

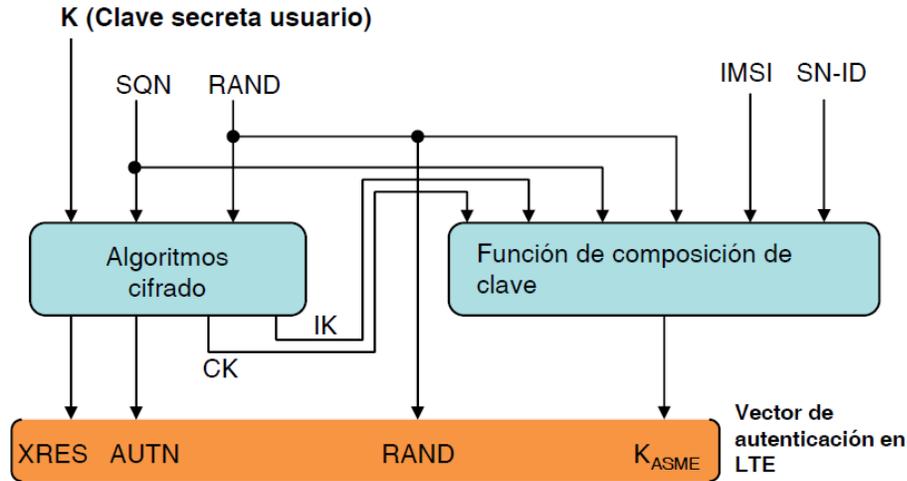
En la Figura 2-25 se muestra gráficamente el contenido del vector de autenticación en LTE junto con las funciones y parámetros de entrada que se utilizan para su obtención. El resto de parámetros que se muestran en la figura son:

- IMSI: Identificador del usuario. Se utiliza en la generación de la clave K_{ASME} .
- SQN: Número de secuencia asociado a un IMSI. Se utiliza para disponer de un mecanismo que permita ordenar los vectores de autenticación secuencialmente y evitar, por ejemplo, ataques de repetición (utilización malintencionada de un vector de autenticación “viejo”).

¹⁶ Tomado del documento William Stallings, “Cryptography and Network Security”, Third Edition, Ed. Prentice Hall, 2003.

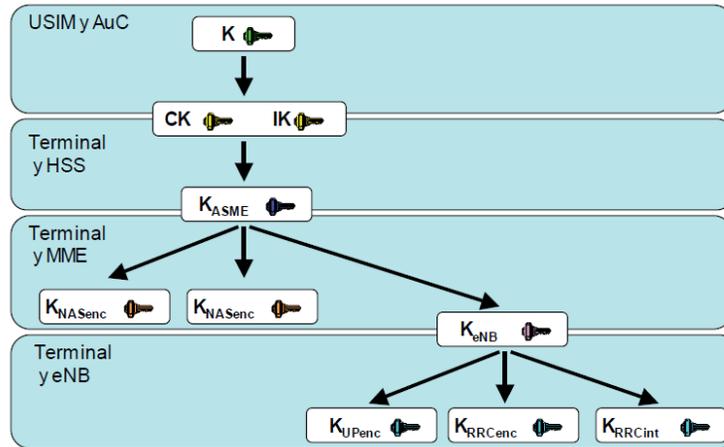
- SN-ID: Identificador de la red que proporciona el servicio de conectividad al usuario. Mediante la inclusión de este parámetro, las claves K_{ASME} generadas en el HSS se particularizan para la red utilizada que puede ser diferente gracias al servicio de itinerancia (*roaming*) y a la posibilidad de acceder a los servicios a través de redes no 3GPP.

Figura 1-28. Vector de autenticación en LTE¹⁷



La entidad MME utiliza el vector de autenticación para sustentar el mecanismo EPS AKA. Además, a partir de clave K_{ASME} contenida en el vector de autenticación se derivan el resto de claves utilizadas por los diferentes servicios de confidencialidad e integridad. La jerarquía de claves de LTE para la implementación de tales servicios se muestra en la Figura 2-26. Las claves K_{NASenc} y K_{NASint} son utilizadas, respectivamente, en el servicio de confidencialidad e integridad para la transferencia de la señalización NAS. Ambas claves son derivadas a partir de la clave K_{ASME} en el terminal y en la entidad MME, que son los dos puntos de terminación de los protocolos NAS. A partir de la clave K_{ASME} también se deriva una clave de seguridad K_{eNB} que, en la parte de la red, la entidad MME transfiere al eNB al que se encuentra conectado el terminal. De esta forma, tanto eNB como terminal, a partir del conocimiento de la clave K_{eNB} , pueden derivar las claves utilizadas en la interfaz radio para proporcionar confidencialidad al plano de usuario (clave K_{UPenc}) y confidencialidad e integridad a la señalización RRC (claves K_{RRCenc} y K_{RRCint}). La clave K_{eNB} y sus claves derivadas nunca se transmiten por la interfaz radio.

¹⁷ Tomado del documento 3GPP TS 33.210, “3G Security; Network Domain Security; IP network layer security”.

Figura 1-29. Jerarquía de claves de seguridad¹⁸

Los algoritmos de cifrado para la provisión de los servicios de confidencialidad e integridad en E-UTRAN se denominan UEA2 (UMTS *Encryption Algorithm 2*) y UIA2 (UMTS *Integrity Algorithm 2*), ambos especificados en la Versión 7 de UMTS. Como alternativa, E-UTRAN también contempla la utilización de algoritmos basados en AES (*Advanced Encryption Standard*), uno de los algoritmos más populares de cifrado simétrico que existen en la actualidad [18].

1.9.4.2. Seguridad en la infraestructura de red

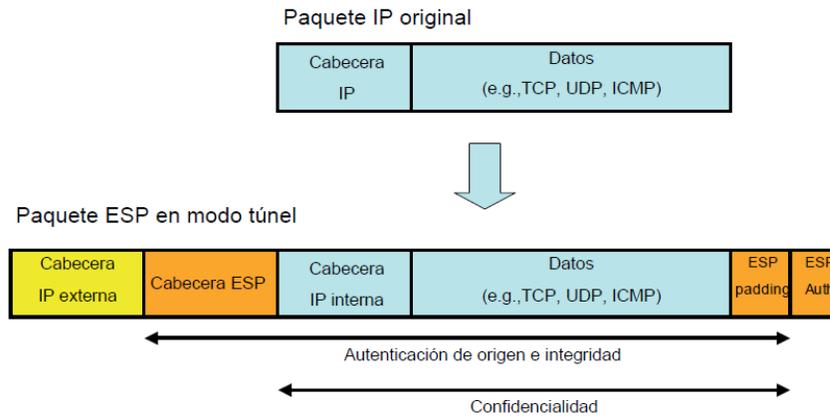
La solución planteada para proporcionar seguridad en las interfaces internas de la infraestructura de red basadas en torres de protocolos IP se denomina *Network Domain Security for IP* (NDS/IP) y se especifica en el documento 3GPP TS 33.210 [19]. NDS/IP establece los mecanismos de seguridad que pueden utilizarse para la transferencia segura de información entre los equipos que forman parte de la infraestructura de red de un mismo operador así como entre los equipos que enlazan las redes de diferentes operadores. NDS/IP se ha diseñado para proteger los protocolos del plano de control, a través de los cuales se transporta la información más sensible (transferencia de datos de suscripción, vectores de autenticación, etc.). No obstante, la solución NDS/IP también es válida para proteger los protocolos de plano de usuario en las interfaces internas de la red (interfaces basadas en GTP-U). La solución NDS/IP se basa en la utilización de IPsec definido en IETF RFC4301 [20]. IPsec es una colección de protocolos y algoritmos para proporcionar seguridad en la capa de red, incluyendo la gestión de claves. En la solución NDS/IP, el protocolo de seguridad IPsec utilizado es ESP (*Encapsulating Security Payload*) definido en IETF RFC 4303 [21].

ESP permite ofrecer servicios de confidencialidad, integridad y autenticación del origen de datos. En la Figura 2-27 se ilustra el formato de un paquete del protocolo IPsec ESP operando en modo túnel. En este modo, el protocolo IPsec ESP permite establecer un túnel entre dos puntos de una red IP donde el paquete IP original se transporta encapsulado en otro paquete IP junto con cabeceras especificadas por el protocolo ESP. La dirección IP del paquete original se denomina dirección IP interna del túnel (*inneraddress*) y la dirección del paquete ESP en modo túnel se refiere como dirección externa del túnel (*outeraddress*). El servicio de confidencialidad cubre el paquete IP original junto con una serie de bits de *padding* (relleno) que pueden ser necesarios en función del algoritmo de cifrado que se utilice (los algoritmos de cifrado suelen procesar la información en bloques de bits de tamaño fijo). Por otro lado, la integridad y autenticación del paquete IP original cifrado y la cabecera ESP se realiza mediante un

¹⁸ Tomado del documento IETF RFC 4306, "Internet Key Exchange Protocol Version 2".

checksum criptográfico que se añade al final del paquete ESP. Además del modo túnel representado en la figura, el protocolo ESP también soporta el modo transporte. A diferencia del modo túnel, el modo transporte no añade una cabecera externa adicional sino que utiliza la cabecera del paquete IP original (con lo que la cabecera no queda protegida por el servicio de confidencialidad ya que ésta debe ser procesada por los *routers* de la red) [17].

Figura 1-30. Formato de un paquete IPsec ESP en modo túnel¹⁹

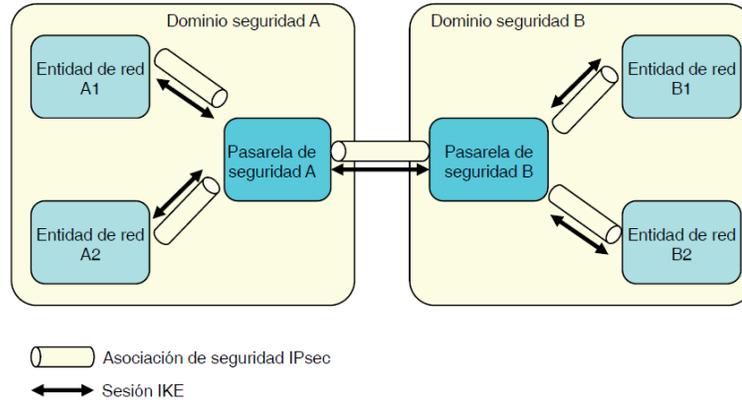


La aplicación de IPsec en la solución NDS/IP es diferente en función de cómo se encuentre estructurada la red en términos de dominios de seguridad. Un dominio de seguridad se concibe el conjunto de equipos que una red que están gestionados por la misma autoridad administrativa. Un ejemplo de un dominio de seguridad podría ser la red de un mismo operador de red (una red LTE, una red de tránsito, etc.), no quedando excluida la posibilidad de un operador decida estructurar su red en varios dominios de seguridad diferentes. Bajo esta perspectiva, la arquitectura de la solución DS/IP se representa en la Figura 2-28. Las entidades de red representadas en la figura pueden ser cualquiera de las entidades de red que forma parte de la arquitectura del sistema LTE (eNB, MME, P-GW, etc.). El tráfico que se transfiere entre dominios de seguridad diferentes debe protegerse mediante la utilización de pasarelas de seguridad (SEG). Las pasarelas de seguridad utilizan IPsec ESP en modo túnel para enviar la información entre dominios (entre las redes del operador matriz y la red visitada en un servicio de itinerancia).

Las pasarelas utilizan el protocolo *Internet Key Exchange* (IKE), bien la versión IKEv1 o IKEv2 [22], para establecer las asociaciones de seguridad necesarias para el funcionamiento de IPsec. Por otro lado, en las comunicaciones entre equipos del mismo dominio de seguridad, el operador es quien decide el grado de seguridad que quiera utilizar. En este caso, pueden existir interfaces que no se protejan e interfaces que hagan uso de los mismos mecanismos especificados entre las pasarelas de seguridad. En las transferencias dentro de un dominio de seguridad el protocolo ESP puede utilizarse también en modo transporte. Una interfaz especialmente crítica en la infraestructura de una red LTE es la interfaz S1 entre la red troncal EPC y un eNB. Los servicios de confidencialidad del plano de usuario en LTE únicamente abarcan la interfaz radio (se soportan en la capa PDCP). Por tanto, en el plano de usuario de la interfaz S1, el tráfico IP cursado por los usuarios se transmite sin protección por lo que la aplicación de los mecanismos considerados en la solución NDS/IP puede ser apropiada atendiendo a la seguridad física del emplazamiento donde se encuentre instalado el eNB [22].

¹⁹ Tomado del documento 3GPP TS 33.102, “3G security; Security architecture”.

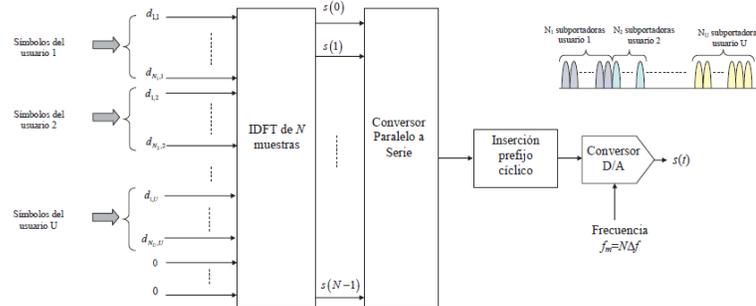
Figura 1-31. Arquitectura de la solución NDS/IP²⁰



1.2. OFDMA como técnica de acceso múltiple para el enlace descendente

La técnica de acceso múltiple OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), utilizada en el enlace descendente de LTE, considera la posibilidad de que los diferentes símbolos modulados sobre las sub-portadoras pertenezcan a usuarios distintos. De esta forma, es posible acomodar varias transmisiones simultáneas correspondientes a diferentes flujos de información al viajar en sub-portadoras diferentes, tal y como se ilustra en el esquema de transmisión de la Figura 2-29. Obsérvese que en dicha figura existen U flujos de información correspondientes a diferentes usuarios, siendo N_k el número de símbolos enviado para el usuario k -ésimo, y donde $d_{i,k}$ representa el i -ésimo símbolo del k -ésimo usuario. Análogamente, en el receptor de cada usuario bastará con recuperar el contenido de las sub-portadoras asignadas a dicho usuario para separar la información destinada a este usuario de la del resto (obsérvese que será preciso disponer de los mecanismos de señalización adecuados para notificar a cada usuario a través de qué sub-portadoras se le está enviando la información) [23].

Figura 1-32. Multiplexación de usuarios en OFDMA²¹



²⁰ Tomado del documento 3GPP TS 33.331, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (Release 8)”.

²¹ Tomado del documento F. Khan, LTE for 4G Mobile Broadband, Cambridge University Press, 2009.

1.2.1. Sistemas celulares OFDMA

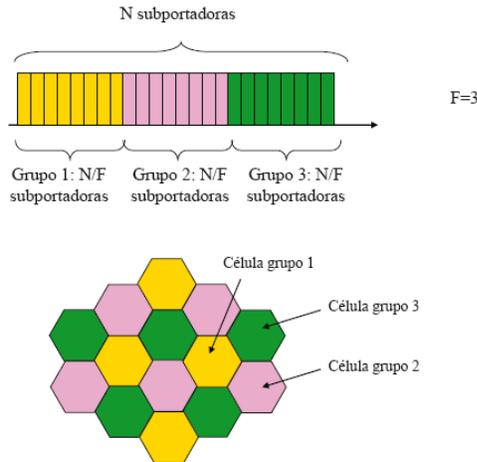
El despliegue de un sistema de comunicaciones móviles para proporcionar cobertura a una determinada región se basa en la distribución de un conjunto de estaciones base o células por el territorio a cubrir, de modo que cada una proporciona la cobertura a los usuarios de una zona geográfica, y entre todas las bases aseguran la cobertura de todo el territorio. Esto da lugar a lo que tradicionalmente se ha denominado un sistema celular, y que se ha venido empleando en todos los sistemas de comunicaciones móviles previos a LTE, tales como GSM o UMTS [23].

Uno de los problemas a los que se debe hacer frente en un sistema celular consiste en determinar qué recursos radio se asignan a las diferentes estaciones base para conseguir, por un lado, disponer de la suficiente capacidad de acuerdo con la cantidad de usuarios a los que cada base debe dar servicio, y por el otro lado conseguir una utilización eficiente de dichos recursos, intentando consumir el mínimo número de ellos [24].

Esta asignación de recursos a bases está completamente ligada a la técnica de acceso múltiple empleada. Así, por ejemplo en el caso de GSM, que emplea una combinación de acceso múltiple por división en tiempo y en frecuencia (TDMA/FDMA), se suele asignar a cada estación base un conjunto de radiocanales diferente que pueden reutilizarse en otras estaciones base que se encuentren a una cierta distancia de la base en cuestión, para asegurar que no haya interferencia intercelular apreciable. Por el contrario, en el caso de UMTS, que emplea la técnica de acceso múltiple por división en código (CDMA), todas las bases utilizan la misma frecuencia pero con diferentes secuencias código (los denominados códigos de scrambling). En este caso, además de la diferenciación por código, con objeto de acotar la interferencia intercelular, es preciso el empleo de técnicas de control de la potencia transmitida [24].

Por su parte, en el caso de los sistemas celulares basados en OFDMA, en los que la banda total se subdivide en un conjunto de sub-portadoras, y por lo tanto presentan intrínsecamente una componente FDMA, una forma natural de proceder consistiría en emplear técnicas de reutilización de frecuencia similares a las de los sistemas de segunda generación como GSM. En este caso, el conjunto total de sub-portadoras disponible se subdivide en F grupos (siendo F el factor de reuso) cada uno de los cuales se asigna a una célula diferente de un conjunto de F células denominado *cluster*. A su vez, cada uno de los grupos se reutiliza en células pertenecientes a diferentes *clusters*. Este proceso se ilustra en la Figura 2.30 para un caso de factor de reuso $F=3$ asumiendo que cada base se encarga de dar servicio a un área hexagonal. Como puede apreciarse, mediante este mecanismo se garantiza que células adyacentes no trabajen con las mismas sub-portadoras y por lo tanto no se interfieran mutuamente [25].

Obsérvese que, a base de incrementar el valor de F , se consigue alejar más las células que utilizan la misma frecuencia y por lo tanto reducir la interferencia intercelular. Sin embargo, esto es a costa de que el número de sub-portadoras por célula N/F se reduce, lo cual se traducirá en una reducción de la capacidad de la célula, por lo que en general no interesará utilizar valores de F muy elevados [25].

Figura 1-33. Ejemplo de asignación de sub-portadoras a células según un factor de reuso $F=3$.²²

1.2.2. Parámetros de OFDMA empleados por LTE

Un caso particular de redes celulares OFDMA son las denominadas redes isofrecuenciales, en inglés *Single Frequency Networks* (SFN), que pueden utilizarse para sistemas de transmisión *broadcast o multicast*, es decir para entregar la misma información a diferentes usuarios que se ubican en células diferentes, por ejemplo el caso de servicios de televisión, servicios de difusión de información como noticias, etc. La separación definida entre sub-portadoras es de $\Delta f=15$ kHz, si bien también existe un espaciado reducido de 7.5 kHz, particularmente pensado para el caso de transmisión multicast en SFN [25]. Las sub-portadoras se agrupan en bloques de 12 sub-portadoras consecutivas, con un ancho de banda resultante de $12\Delta f=180$ kHz, constituyendo cada uno de estos bloques un recurso en el dominio frecuencial, o equivalentemente la unidad mínima de asignación de recursos a un usuario. A partir de aquí, el número total de sub-portadoras ocupadas por una portadora LTE en el enlace descendente es de $N_S=12N_B+1$, siendo N_B el número de bloques de 12 sub-portadoras utilizados. En esta última expresión, hay que tener en cuenta que la sub-portadora en el centro de la banda no se utiliza en ninguno de los bloques, en tanto que puede ser altamente interferida por el oscilador local en recepción [26]. La flexibilidad en el ancho de banda ocupado viene dada por el número de bloques N_B utilizados, que puede tomar los valores $\{6, 15, 25, 50, 75, 100\}$, correspondiente a anchuras de banda de transmisión de $BW=(12N_B+1)\Delta f=\{1.095, 2.715, 4.515, 9.015, 13.515, 18.015\}$ MHz. De acuerdo con estos valores, se pueden configurar diferentes espaciados entre canales LTE, correspondientes a $\{1.4, 3, 5, 10, 15, 20\}$ MHz, en los que, como puede observarse, la anchura de banda ocupada es aproximadamente un 90% del espaciado entre canales (excepto para el caso de 1.4 MHz, que es del 78%). En concreto, la duración del símbolo OFDM, que corresponde al inverso de la separación entre sub-portadoras, $TS=1/\Delta f=66.67$ μs , puede expresarse como $TS=2048 T_m$. En relación a las modulaciones empleadas, en el enlace descendente de LTE pueden utilizarse QPSK, 16QAM y 64 QAM, correspondientes a 2, 4 y 6 bits por símbolo, respectivamente [27].

²² Tomado del documento E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld, P. Beming, 3G Evolution. HSPA and LTE for Mobile Broadband, Academic Press, Elsevier, 1a edición, 2007.

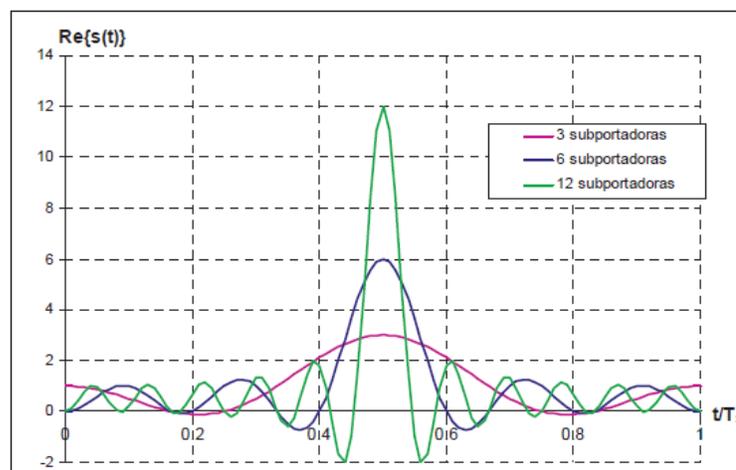
1.3. FDMA como técnica de acceso múltiple para el enlace ascendente

Uno de los aspectos importantes a tener en cuenta en la elección de una modulación para un sistema de comunicaciones es la variación en la potencia instantánea de la señal transmitida, en tanto que si es muy grande la eficiencia de los amplificadores de potencia se reduce. Una métrica para caracterizar esta variación es el denominado factor de cresta o PAPR (del inglés *Peak-to-Average-Power Ratio*), que en definitiva mide la relación entre la potencia instantánea de la señal transmitida respecto de la potencia media, y que se define matemáticamente como [28]:

$$PAPR = \frac{|s(t)|^2}{E[|s(t)|^2]}$$

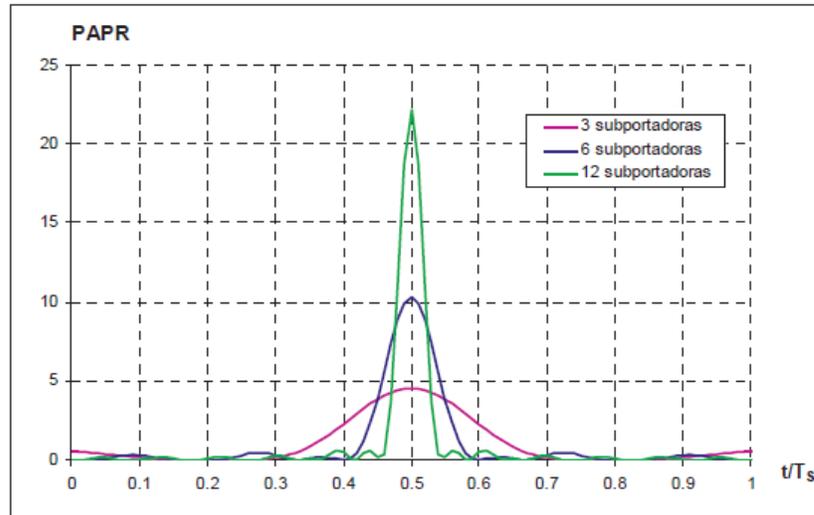
Habiendo señales con un valor de PAPR muy grande requieren amplificadores de potencia altamente lineales para evitar la distorsión asociada a la intermodulación. Para conseguir esta elevada linealidad, el amplificador debe operar bastante por debajo de su potencia de pico, lo que se traduce finalmente en una eficiencia reducida, entendida dicha eficiencia como la relación entre la potencia transmitida respecto de la potencia consumida. En el caso de modulaciones multi-portadora, como ocurre con OFDM (y por extensión con OFDMA), el PAPR se incrementa al incrementar el número de sub-portadoras utilizadas. Este efecto se ilustra gráficamente en la Figura 2-31 y en la Figura 2-32, que muestran, respectivamente, la evolución temporal de un símbolo OFDM y del PAPR resultante cuando se emplean 3, 6 y 12 sub-portadoras, moduladas por una secuencia de símbolos alternados +1 y -1. Como puede apreciarse, el incremento en el número de sub-portadoras se traduce en un incremento en el valor máximo del PAPR que puede llegar a existir [29].

Figura 1-34. Ejemplo de la evolución temporal de un símbolo OFDM compuesto por 3, 6 y 12 Sub-portadoras, moduladas por una secuencia de símbolos alternados +1, -1.²³



²³ Tomado del documento A. Pokhariyal, T.E. Kolding, P.E. Mogensen "Performance of Downlink Frequency Domain Packet Scheduling for the UTRAN Long Term Evolution", 17th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Helsinki, septiembre, 2006.

Figura 1-35. Ejemplo del PAPR para un símbolo OFDM compuesto por 3, 6 y 12 sub-portadoras, moduladas por una secuencia de símbolos alternados +1, -1.²⁴



1.3.1. Esquemas de transmisión y recepción SC-FDMA

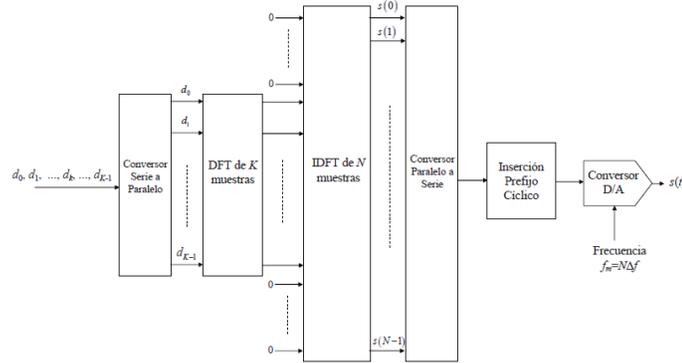
A la hora de seleccionar el esquema apropiado para el enlace ascendente de LTE, se intentaron conjugar las siguientes propiedades deseables:

- Variaciones reducidas en la potencia instantánea de la señal transmitida, en términos de un valor de PAPR reducido, para conseguir una mayor eficiencia en los amplificadores de potencia y un menor coste de los mismos.
- Posibilidad de llevar a cabo de forma sencilla mecanismos de ecualización en el dominio de la frecuencia el cual presentan una menor complejidad que la ecualización en el dominio temporal.
- Capacidad de proporcionar una asignación de banda flexible, que pueda variarse de forma sencilla de acuerdo con las diferentes necesidades de transmisión de los diferentes usuarios.

De acuerdo con los tres requerimientos anteriores, la técnica de acceso múltiple seleccionada SC-FDMA de hecho se basa en unos principios de transmisión muy similares a los de OFDM, pero efectuando una precodificación de los símbolos a transmitir previa al proceso de transmisión OFDM, lo que permite reducir las variaciones en la potencia instantánea. El esquema de transmisión en banda base resultante para SC-FDMA se muestra en la Figura 2-33. Como puede apreciarse, existen K símbolos a transmitir, los cuales son precodificados mediante una DFT de K muestras, como paso previo a efectuar una transmisión OFDM de acuerdo con una IDFT de N muestras, con una separación entre sub-portadoras Δf , y con el consiguiente añadido del prefijo cíclico. Debido al proceso de precodificación basado en DFT, esta técnica de transmisión de señal también suele denominarse como *DFT-Spread OFDM* (DFTS-OFDM) [30].

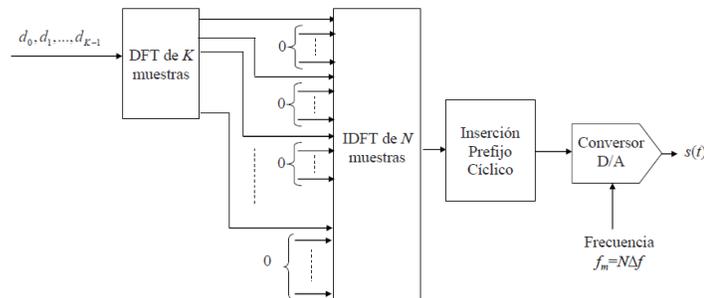
²⁴ Tomado del documento W.C.Y. Lee, *Mobile Communications Engineering*, Ed, McGraw Hill, 1982.

Figura 1-36. Esquema de transmisión de la señal SC-FDMA.²⁵



Claramente, en el esquema mostrado, en el caso de que el tamaño de la DFT, K , fuera igual al de la IDFT, N , los procesos de DFT y de IDFT se cancelarían entre sí sin tener ningún efecto, por lo que de hecho la señal enviada sería simplemente el mismo conjunto de símbolos original, resultando en una señal en banda base no modulada sobre diferentes sub-portadoras, esto es, una señal de portadora única (*single carrier*), que presenta mejores propiedades de PAPR que las señales multiportadora. Otro esquema posible de transmisión SC-FDMA, consistente en no ubicar las K muestras de salida de la DFT de forma contigua sino en distribuir las K muestras de salida de la DFT de forma equidistante de la IDFT, ubicando ceros en las posiciones intermedias. Por este motivo, este esquema se denomina SC-FDMA distribuido, a diferencia del presentado anteriormente en la Figura 2-33, que se conoce como localizado. Por simplicidad, en la Figura 2-34 se ha obviado la representación explícita de los conversores serie a paralelo y paralelo a serie que se muestran en las otras figuras. Hay que hacer notar que, si bien el esquema distribuido resulta en que la transmisión ocupa diferentes porciones de espectro no contiguas, las variaciones de potencia en términos de PAPR son similares a las del esquema localizado, y por otra parte, el esquema distribuido proporciona una mayor diversidad frecuencial en tanto que la señal se distribuye entre portadoras separadas. Si bien ambos esquemas son viables técnicamente, desde la perspectiva de LTE para el enlace ascendente, ha sido el esquema localizado el seleccionado, en tanto que es menos sensible a los errores de frecuencia [31].

Figura 1-37. Esquema de transmisión SC-FDMA distribuido.²⁶



²⁵ Tomado del documento H.G.Myung, J. Lim, D.J. Goodman, "Single Carrier FDMA for Uplink Wireless Transmission", IEEE Vehicular Technology Magazine, septiembre, 2006, pp. 30-38.

²⁶ Tomado del documento H.G.Myung, J. Lim, D.J. Goodman, "Single Carrier FDMA for Uplink Wireless Transmission", IEEE Vehicular Technology Magazine, septiembre, 2006, pp. 30-38.

1.3.2. Parámetros de SC-FDMA empleados por LTE

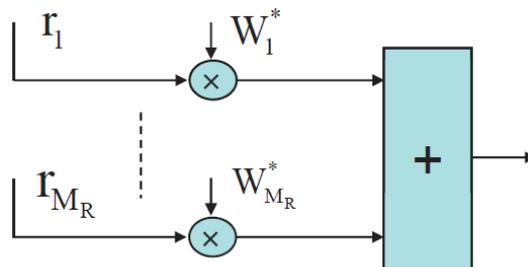
Los parámetros definidos para SC-FDMA en el contexto del enlace ascendente para LTE presentan bastantes similitudes con los del enlace descendente, en tanto que la técnica de transmisión se basa en principios similares. En particular, la separación entre sub-portadoras es también de $\Delta f=15$ kHz agrupadas en bloques de 12 sub-portadoras cada uno. Dichos bloques se pueden asignar de forma flexible a los diferentes usuarios según sus necesidades, con la única limitación de que, al emplearse SC-FDMA localizado, todas las sub-portadoras asignadas a un único usuario deben ser contiguas [33].

A diferencia del enlace descendente, el número de sub-portadoras total disponible es de $N_S=12N_B$, ya que ahora no se deja sin utilizar la sub-portadora central de la banda. Puesto que con SC-FDMA un usuario debe ocupar un conjunto de sub-portadoras contiguas, gracias a permitir el uso de la sub-portadora central, sería potencialmente posible llegar a asignar todas las sub-portadoras de la banda a un único usuario. Por otra parte, la posible interferencia del oscilador local sobre la sub-portadora central, que era el problema del enlace descendente, gracias a la precodificación basada en la DFT empleada por SC-FDMA quedaría dispersada sobre toda la banda ocupada, por lo que no resulta ser tan crítico como en el enlace descendente [33].

1.4. Estructuras con varias antenas

La diversidad en espacio es la primera estructura con varias antenas ampliamente usada en comunicaciones móviles. Se basa en el hecho de que un canal móvil se caracteriza por una respuesta impulsional aleatoria y variante no sólo en el dominio temporal sino también en el dominio espacial. Así, considerando M_R antenas en recepción suficientemente separadas, se puede conseguir a la salida de los M_R canales formados entre la antena transmisora y las M_R antenas receptoras, M_R réplicas independientes de la misma señal transmitida [34]. Una consecuencia de ello es que al combinar estas distintas réplicas, como indica la Figura 2-35, se puede conseguir a la salida de un combinador apropiado una nueva señal con un mayor nivel de potencia instantánea, y de este modo recuperar finalmente la señal de información modulada en mejores condiciones de relación potencia de señal a potencia de ruido [34].

Figura 1-38. Esquema de Diversidad en Espacio.²⁷



En estas circunstancias una combinación MRC (*Maximum Ratio Combining*) (Figura 2-35) es una combinación lineal óptima donde los distintos pesos [34] $W_1^*, W_2^*, \dots, W_{M_R}^*$ resultantes conducen a que

²⁷ Tomado del documento W.C.Y. Lee, *Mobile Communications Engineering*, Ed, McGraw Hill, 1982.

la relación señal a ruido resultante γ_R en cada instante de tiempo es la suma de las relaciones señal a ruido a la entrada del combinador $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_{MR}$.

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_{MR}$$

La estructura de antenas anteriores se la conoce como SIMO (*Single Input Multiple Output*) y a la ganancia media obtenida en el valor de la relación señal a ruido γ se la denomina ganancia de la estructura de antenas o *array gain*. Al ser iguales las relaciones medias de señal a ruido en cada rama, resulta que el *array gain* es igual al número de antenas M_R . La diversidad en espacio puede también hacerse en transmisión, de modo que la señal es transmitida por cada una de las M_T antenas después de haber sido convenientemente modificada en módulo y fase de modo que en recepción las distintas señales recibidas por la única antena receptora lleguen en fase y se sumen coherentemente [34]. Esta estrategia conduce a una estructura MISO (*Multiple Input Single Output*) y es una réplica MRC de la usada con la estructura SIMO, siendo ahora la relación señal a ruido en el receptor.

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_{MT}$$

Y el *array gain* definido también como la ganancia media obtenida en el valor de la relación señal a ruido γ es ahora igual a M_T . Con los esquemas en diversidad es factible a través de los combinadores adecuados [34] obtener comportamientos asintóticos de la tasa de error de bit en entornos Rayleigh de acuerdo con la expresión.

$$P_b \rightarrow \frac{1}{\gamma_i^M}$$

Donde γ_i es la relación señal a ruido en cada una de las ramas de recepción, supuestas iguales, y M el orden de la diversidad que coincide con el número de antenas. De una manera más formal se define la ganancia en diversidad como.

$$-\frac{\log_2 P_b}{\log_2 \gamma}$$

Que coincide con la ganancia en el valor de la pendiente de la tasa de error en función de la relación señal a ruido en una escala doble logarítmica obtenida para un sistema en diversidad con respecto a un sistema sin diversidad que tiene pendiente 1. Esta ganancia de diversidad, en conjunción con el *array gain*, caracteriza las prestaciones de estas estructuras de antenas [34].

Desde un punto de vista práctico la combinación MRC en transmisión no es simple de conseguir, ya que es el receptor quien conoce las respuestas impulsionales de los M_T canales que se forman entre las M_T antenas transmisoras y la receptora, y este conocimiento se debe trasladar al transmisor vía y señalización para su correcta implementación. En estas condiciones, las estructuras de combinación conocidas como técnicas ST (*Space-Time Diversity coding*) hacen esa señalización innecesaria a costa de una degradación en las prestaciones de la diversidad en lo que se refiere al *array gain*. Las técnicas usadas permiten extraer la diversidad inherente de los M_T canales formados en ausencia del conocimiento del canal en el transmisor. Las técnicas ST introducidas se basan en una codificación a través del espacio (distintas antenas) y el tiempo (símbolos sucesivos) con objeto de conseguir la diversidad descrita [35].

Tanto con la diversidad espacial en recepción, como con la diversidad espacial en transmisión, se pueden conseguir mejoras de la capacidad del canal resultante al aumentar la relación señal a ruido a la entrada del receptor, $SNR=\gamma$, linealmente con el número de antenas. No obstante ello, esta capacidad, siguiendo la conocida expresión introducida por Shannon, continúa teniendo la misma naturaleza de $C=B \log_2 (1+\gamma)$ bits/s, inicialmente descrita. Es decir la capacidad o máxima velocidad de transmisión C para una banda B que se podría conseguir libre de errores crece sólo de modo logarítmico con la relación señal a ruido [36].

Introduciendo en la formulación de la capacidad la relación comúnmente usada de energía de bit a densidad espectral de potencia de ruido (E_b/N_0), la presencia de M antenas ($M=MT$ o $M=MR$ dependiendo del tipo de diversidad) y en consecuencia un *array gain* = M , para conseguir una velocidad de transmisión R en bits por segundo (b/s), resulta.

$$R < C = B \cdot \log_2 \left(1 + M \frac{E_b R}{N_0 B} \right),$$

O lo que es equivalente, la cota inferior de la E_b/N_0 necesaria para una velocidad R es:

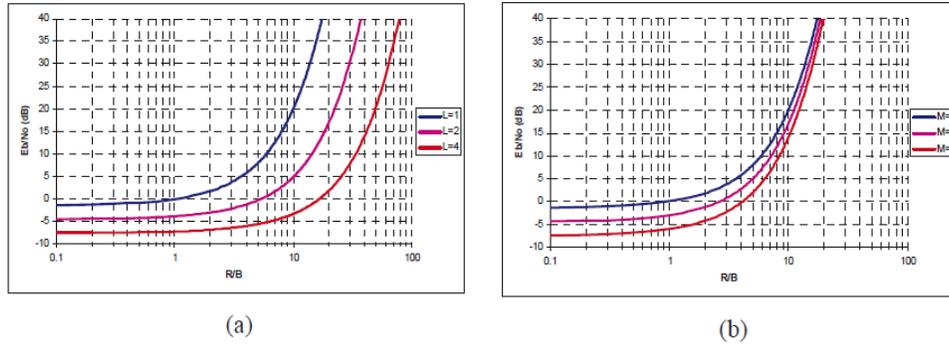
$$\frac{E_b}{N_0} \geq \frac{1}{M} \frac{2^{\left(\frac{R}{B}\right)} - 1}{\frac{R}{B}}.$$

La naturaleza exponencial de la anterior expresión nos indica que la relación $\frac{E_b}{N_0}$ puede hacerse muy elevada para valores de la velocidad de transmisión superiores a B , como es el caso en los sistemas que requieren una alta eficiencia espectral (medida como R/B b/s/Hz) como LTE. En tales sistemas, la diversidad espacial en recepción sola podría resultar insuficiente, aun contando con esquemas de transmisión avanzados que introduzcan codificación de canal y modulaciones adaptativas con distintos niveles, tal como QAM [37].

Una nueva estrategia derivada de explotar la presencia de M_T antenas en transmisión y M_R antenas en recepción surge con la aparición en los laboratorios Bell en USA [38] del concepto de MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). La diferencia, conceptualmente relevante en relación a las estrategias de diversidad SIMO y MISO, es que la estrategia MIMO pretende explotar la variación espacial del canal móvil creando de hecho L caminos de transmisión paralelos desacoplados (Ejemplo, se envía información diferente por cada camino) entre el emisor y el receptor, siendo idealmente $L=\min(M_T, M_R)$. A este concepto se le conoce con el nombre de multiplexado espacial. La capacidad del canal en ciertas condiciones puede llegar a valer $C=L B \log_2 (1+\gamma)$. Observando que en tales circunstancias la capacidad aumenta linealmente con el número de antenas, o lo que es equivalente, la E_b/N_0 necesaria para conseguir una velocidad de transmisión $R=C$ es:

$$\frac{E_b}{N_0} \geq \frac{1}{M} \frac{2^{\left(\frac{R}{L}\right)} - 1}{\frac{R}{B}}.$$

Figura 1-39. E_b/N_0 versus R/B para diferentes valores de (a) L en el caso de MIMO y (b) M en el caso de diversidad.²⁸



A diferencia de los sistemas basados sólo en diversidad, la E_b/N_0 recibida necesaria para conseguir sistemas de alta eficiencia espectral, tales como los previstos en LTE, queda sustancialmente reducida al usar multiplexado espacial. En la Figura 2-36 se representa una cota inferior de la E_b/N_0 necesaria para distintos valores de eficiencia espectral medida como R/B . Se puede observar en la Figura 2-36 que a medida que aumenta L se pueden conseguir eficiencias espectrales más elevadas para los esquemas MIMO que para los esquemas que operan sólo con diversidad. En particular, se observa que para los sistemas en diversidad con eficiencias espectrales elevadas, la E_b/N_0 necesaria es mucho mayor que para los MIMO y es poco sensible al orden de la diversidad. Observemos también que para eficiencias R/B pequeñas o para E_b/N_0 pequeñas ambas estructuras, las MIMO y las de diversidad presentan comportamientos similares. En conclusión, las estructuras de antenas MIMO representan un salto cualitativo respecto a los sistemas de diversidad SIMO y MISO, y abren las puertas a conseguir sistemas de velocidad de transmisión elevadas, pero con potencias recibidas y por tanto coberturas y distancia entre emplazamientos abordables [38].

1.4.1. Formulación de las Estructuras MIMO

Se puede formular un sistema MIMO como un sistema de ecuaciones tal como:

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^{M_T} h_{i,j}(\tau, t) * S_j(t), \quad i = 1, 2, \dots, M_R,$$

Donde $y_i(t)$ es la señal recibida en el extremo receptor a la salida de la antena i -ésima, $h_{i,j}(\tau, t)$ es la respuesta impulsional del canal móvil en el instante t entre la antena transmisora j -ésima y la antena receptora i -ésima, $S_j(t)$ es la señal de entrada a la antena transmisora j -ésima. Podemos observar como esta formulación es una generalización de las estructuras SIMO (una antena en emisión y M_R en recepción) y MISO (M_T antenas en transmisión y una antena en recepción), en los que $S_j(t) = S(t)$ para todos los caminos. Esta formulación también captura la situación más convencional de las estructuras SISO (*Single Input Single Output*, una antena en emisión y una antena en recepción), en este caso, el sistema de ecuaciones anterior se reduce a la formulación clásica para un canal móvil donde la señal de salida es la convolución de la señal de entrada y la respuesta impulsional del canal.

²⁸ Tomado del documento W.C.Y. Lee, *Mobile Communications Engineering*, Ed, McGraw Hill, 1982.

$$y(t) = h(\tau, t) * s(t).$$

1.4.2. Capacidad de las Estructuras MIMO

La capacidad de un canal de comunicaciones que contemple estructuras con varias antenas transmisoras y receptoras se puede obtener generalizando la expresión clásica de la capacidad de un canal C de ancho de banda B y relación señal a ruido γ introducida por primera vez por Shannon y ya mencionada anteriormente como:

$$C = B \log_2(1 + \gamma).$$

El hecho de que las modernas técnicas de codificación y modulación permitan ya alcanzar velocidades de transmisión muy próximas al límite establecido por la capacidad de un canal de comunicaciones, otorgan 'si cabe' un mayor interés al conocimiento de esta expresión.

Para un enlace caracterizado por una respuesta plana del canal, como puede ser el caso de OFDMA en relación a la banda estrecha ocupada por cada una de sus sub-portadoras, las entradas de la matriz \mathbf{H} son. $h_{i,j}(\tau, t) = h_{i,j}(t)\delta(\tau)$ Los $M_T M_R$ posibles canales existentes entre las antenas transmisoras y receptoras son por tanto canales no dispersivos, aunque variantes en el tiempo y afectados por desvanecimientos. En tal caso podemos formular.

$$y = \sqrt{\frac{P}{M_T}} \mathbf{H} \mathbf{s} + \mathbf{n},$$

Donde \mathbf{H} es una matriz cuyas entradas son $h_{i,j}$.

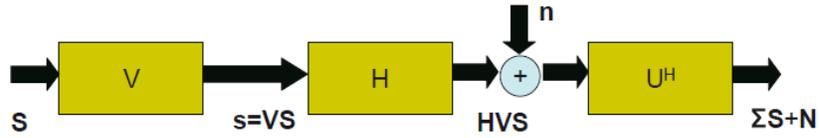
Con objeto de visualizar cómo una estructura MIMO puede proporcionar $L = \min(M_T, M_R)$ caminos paralelos de propagación y el correspondiente multiplexado espacial, que es la esencia de las estructuras MIMO, hacemos uso de la descomposición en valores singulares SVD (*Singular Value Decomposition*) de la matriz de propagación \mathbf{H} , [15] de modo que donde el superíndice H denota en la matriz correspondiente que es transpuesta y conjugada. Las matrices resultantes \mathbf{U} y \mathbf{V} son matrices de dimensión $M_R \times r$ y $M_T \times r$ respectivamente y satisfacen.

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^H$$

$$\mathbf{U}^H \mathbf{U} = \mathbf{V}^H \mathbf{V} = \mathbf{I}_r$$

Donde \mathbf{I}_r es la matriz identidad de dimensión $r \times r$, Σ es una matriz diagonal que presenta los valores $\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r\}$ en la diagonal principal y cero en el resto de posiciones, lo que denotaremos como $\Sigma = \text{diagonal} \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r\} = \text{diagonal} \{\sqrt{\lambda_1}, \sqrt{\lambda_2}, \dots, \sqrt{\lambda_r}\}$, siendo $\sigma_i (i=1, \dots, r)$ los valores singulares de la matriz \mathbf{H} .

Figura 1-40. Descomposición SVD.²⁹



El rango r de la matriz \mathbf{H} (definido como el número de ecuaciones linealmente independientes en el sistema de ecuaciones) nos establece el número de caminos paralelos de propagación que se pueden utilizar, cumpliéndose que $r \leq L = \min(M_T, M_R)$. Al valor de r también se le conoce como ganancia de multiplexado. Con objeto de ver la aplicabilidad de la descomposición SVD, introducimos un vector de entradas de señal de usuario $\mathbf{S} = (S_1, S_2, \dots, S_r)^T$ de dimensión $r \times 1$ que aplicamos a la matriz \mathbf{V} mediante la operación \mathbf{VS} , que denominamos precodificación, tal como se esquematiza en la Figura 2-37. A la salida del denominado precodificador aparece el vector $\mathbf{s} = \mathbf{VS} = (s_1, s_2, \dots, s_{M_T})^T$ de dimensión $M_T \times 1$ cuyos M_T valores constituyen las entradas a las M_T antenas transmisoras. De modo similar en recepción, y a resultados de la matriz de propagación \mathbf{H} , las M_R señales recibidas en las correspondientes M_R antenas receptoras coinciden con las componentes del vector \mathbf{HVS} de dimensión $M_R \times 1$. Finalmente tal como se esquematiza en la Figura 2-37, aplicando este vector de salida a un decodificador caracterizado por \mathbf{U}^H resulta la ecuación.

$$\mathbf{Y} = \sqrt{\frac{P}{M_T}} (\mathbf{U}^H \mathbf{H} \mathbf{V}) \mathbf{S} + \mathbf{U}^H \mathbf{n}$$

Sustituyendo \mathbf{H} por su descomposición $\mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^H$, anteriormente definida, resulta

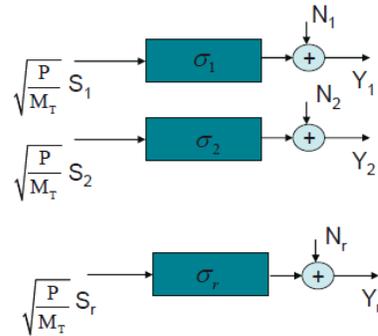
$$\mathbf{Y} = \sqrt{\frac{P}{M_T}} (\mathbf{U}^H \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^H \mathbf{V}) \mathbf{S} + \mathbf{U}^H \mathbf{n} = \sqrt{\frac{P}{M_T}} \mathbf{\Sigma} \mathbf{S} + \mathbf{N},$$

Donde $\mathbf{N} = \mathbf{U}^H \mathbf{n}$ es un vector columna de r fi las correspondiente al ruido resultante e \mathbf{Y} es el vector de salida. Es decir, a la salida de la operación de decodificación que determina el operador \mathbf{U}^H , tenemos r canales paralelos desacoplados.

$$Y = \sqrt{\frac{P}{M_T}} (\sigma_i S_i) + N_i = (i = 1, \dots, r),$$

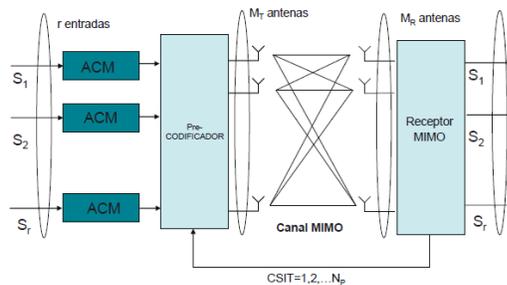
Tal como se esquematiza en la Figura 2-38, donde se ilustra que a todos los efectos podemos imaginar que el esquema MIMO ha transportado las r señales a transmitir desde el extremo emisor al extremo receptor a través de r canales en paralelo desacoplados de ganancia $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r$ respectivamente.

²⁹ Tomado del documento W.C.Y. Lee, “Mobile Communications Design Fundamentals” Ed, Wiley Interscience, 1993.

Figura 2-38: Esquema de una estructura MIMO.³⁰

1.4.3. Precodificación

La capacidad máxima del sistema MIMO se obtiene cuando el emisor es capaz de conocer el valor \mathbf{H} de la matriz de propagación vista en el receptor, que se denomina “*Channel State Information in the Transmitter*” (CSIT). Alternativamente, resulta suficiente si el emisor conoce la matriz \mathbf{V} resultante de la descomposición SVD de la matriz \mathbf{H} , para aplicar el proceso de precodificación. Desgraciadamente la obtención de esta información en el emisor resulta a un coste prohibitivo en términos de *overhead* o peaje de señalización. Nótese que los valores de la matriz \mathbf{V} que se obtendría en el receptor deberían transmitirse de modo que capturasen la variabilidad del canal móvil, es decir cada T segundos, siendo $T \ll T_C$, con T_C el tiempo de coherencia del canal. A modo de ilustración con $T=0.1$ ms, $M_T=4$, $r=4$ y 8 bits de cuantificación por componente de la matriz \mathbf{V} , resultaría una velocidad de transmisión de $128 \cdot 10^4$ b/s. lo que sería impracticable [39].

Figura 1-41. Estructura MIMO con Pre-codificación.³¹

En LTE con objeto de todavía disponer del estado del canal en transmisión (CSIT) se han habilitado estrategias subóptimas. Una de ellas es tener hasta un cierto número NP de matrices de precodificación guardadas en transmisión, de manera que el receptor sólo tiene que enviar cuál de las NP matrices pre registradas resulta la más conveniente. Esta estrategia reduce drásticamente el *overhead*, si bien a costa de aceptar un comportamiento con cierta degradación, pero aún aceptable [39]. Otros procedimientos similares son posibles y están ampliamente abordados en la literatura. Ciertamente con

30 Tomado del documento S.Alamouti, “A Simple Transmit Diversity technique for wireless communication, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998.

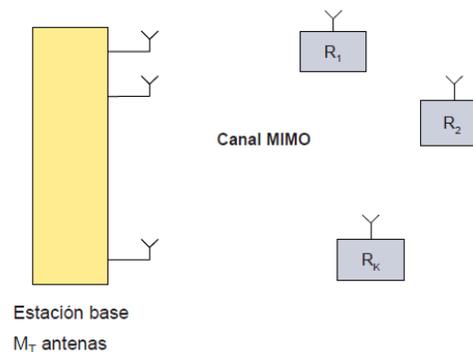
31 Tomado del documento 3GPP TS 36.211 V8.1.0 “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation”, noviembre, 2007.

la paralelización en r canales, tal como en la descomposición SVD de la matriz \mathbf{H} , cada canal está condicionado por una ganancia σ_i . Una optimización de la transmisión conduce entonces al uso de estrategias de modulación y codificación adaptativa que puede ser distinta en cada canal, de modo que los canales mejores que presenten σ_i elevadas tengan más niveles de modulación y menos redundancia de codificación y a la inversa para los canales peores que presenten σ_i pequeñas. La Figura 2-39 ilustra un esquema general donde se capturan las ideas anteriores en relación a la precodificación, la realimentación del CSIT y las técnicas ACM previas por las que los trenes de datos de usuario se codifican con códigos de canal apropiados (e.g turbo códigos) y se modulan con las estrategias nQAM adecuadas al estado del canal. En la medida que en un sistema real la precodificación no es perfecta, entonces la paralelización en r canales tampoco es ideal, y aparece una interferencia entre canales que debe eliminarse, en la medida de lo posible, el receptor MIMO correspondiente. En la literatura se pueden encontrar descripciones con distintas estrategias de optimización, y usando bien receptores de tipo lineal o no lineal [39].

1.4.4. MIMO multiusuario (MU MIMO)

Una extensión en la explotación del multiplexado espacial surge con el MU MIMO (*Multi User MIMO*). A diferencia de las estructuras MIMO. SUMIMO (*Single User MIMO*), compete solamente a la mejora de las prestaciones del enlace entre la estación de base y un móvil, habilitando para ello varios caminos paralelos desacoplados entre ambos, el MU MIMO, lo que se pretende es que hasta K móviles distintos puedan compartirla misma banda de frecuencias. Se pretende con ello explotar una posible ortogonalidad o desacoplo espacial entre los flujos de datos que se transportan entre la base y cada uno de los distintos K móviles (Figura 2-40). En la medida que ello sea factible, lo que se consigue es ya no una mejora de velocidad de transmisión por unidad de banda en el enlace Base-Móvil, sino una mejor eficiencia en la suma de las velocidades de transmisión por unidad de banda en el conjunto de la celda. Es decir, con SU MIMO se pretende aumentar la capacidad del enlace mientras que con MU MIMO se pretende aumentar la capacidad de la celda. Cabe destacar que la primera *release* de LTE contempla estructuras MU MIMO, si bien con sólo una antena operativa en el receptor móvil [40].

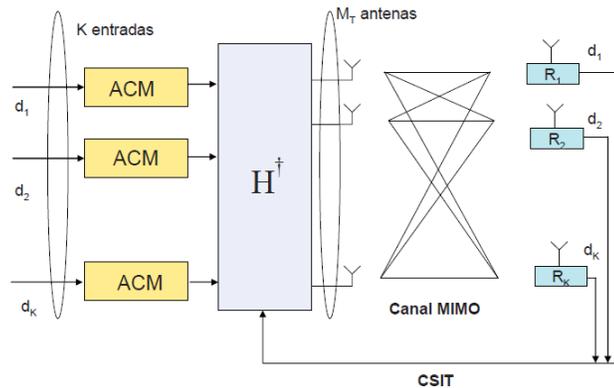
Figura 1-42. Esquema MIMO Multiusuario.³²



³² Tomado Del documento D. Gesbert, M. Kountouris, R. W. Heath, Jr., C.-B. Chae, and T. Salzer, "Shifting de MIMO Paradigm: From Single User to Multiuser Communications", IEEE Signal Processing Magazine, vol. 24, no. 5, pp. 36-46, Oct., 2007.

En la Figura 2-41 se captura una estructura MU MIMO para el enlace descendente con sólo una antena por receptor habilitada para la estructura MU MIMO, tal como se contempla en la *release* 8 actual del LTE. De modo genérico, en esta figura se incorpora también para cada enlace con un usuario un esquema ACM de codificación y modulación adaptativa. En este caso, la matriz \mathbf{H}^\dagger (o \mathbf{H}^{-1}) aplicaría al vector de salida de ACM que se decodificaría en los receptores correspondientes. Al igual como sucedía con la estructura MIMO para sólo un usuario, el conocimiento impreciso del canal en el receptor introduciría interferencia entre usuarios. Ello, unido a la poca robustez de la estrategia *zero forcing* en presencia de ruido, hace más apropiado el uso de estrategias MMSE, en que se parte de que va a existir interferencia entre usuarios y simplemente se minimiza con un criterio de error cuadrático mínimo. Se puede demostrar que en estas circunstancias un precodificador adecuado es $\mathbf{H} = (\mathbf{H}\mathbf{H} + \alpha\mathbf{I})^{-1}\mathbf{d}$: Con $\alpha = K/P$ el valor que maximiza la relación señal a interferencia más ruido (*SINR*) en cada receptor y P la potencia total transmitida en la base [41].

Figura 1-43. Estructura MU MIMO en enlace descendente.³³



Una problemática asociada al MU MIMO reside en que hay que elegir los K usuarios que comparten el enlace descendente en la misma banda de frecuencias y en el mismo tiempo. Es decir la base ha de ser informada de la matriz de propagación de todos los usuarios de la celda con anterioridad a la formación del grupo de K usuarios, cuyo valor está acotado a $(M_T)^2$ [42]. El MU MIMO va más allá de los aspectos de capa física que son los únicos que tocan a los SU MIMO y debe considerar además de los aspectos de potencia y velocidad de transmisión hacia cada terminal móvil, los aspectos relativos a la capa de MAC, al tener que decidir qué usuarios tienen acceso y cuales no en una cierta ventana temporal, en la que se supone que el canal de propagación no cambia significativamente.

Aunque sólo se haya considerado una antena operativa por móvil en el MU MIMO para el enlace descendente, en futuras versiones del LTE se va a permitir más de una antena en recepción, de modo que el receptor móvil pueda explotar además de la diversidad espacial entre la base y los distintos móviles, el propio multiplexado espacial propio de los enlaces con SU MIMO. En este caso, dadas M_T antenas en transmisión y K usuarios, cada uno con M_R antenas en recepción (supongamos $M_R < M_T$), podrá haber hasta $M_R K$ caminos espaciales desacoplados. Se tratará entonces de encontrar cual es la

³³ Ibid

configuración óptima de asignación de caminos a usuarios para cada cierta ventana temporal, con objeto de maximizar la velocidad de transmisión agregada que la base entrega a los K móviles. El gran problema para este tipo de MU MIMO en el enlace descendente lo constituye el CSIT, que inevitablemente se traduce en carga de *overhead* [42].

1.4.5. Comparativa entre estructuras MIMO y MU MIMO

Las estructuras MU MIMO presentan inconvenientes con respecto a las convencionales MIMO tales como [43]:

- Efecto cerca-lejos (*Far-end*), ya que puede haber significativas diferencias en las pérdidas de propagación entre cada usuario y la base, que no siempre pueden ser compensadas debido a la máxima potencia transmitida por un móvil así como a los propios errores del control de potencia, lo que entre otras consecuencias puede redundar en la falta de equidad en el trato a todos los móviles por la base.
- El problema asociado a la propia gestión de la estructura MIMO hay que combinarlo con un *scheduler* adecuado, en relación a los usuarios que comparten un acceso a través de una firma espacial asignada a cada uno para poder habilitar un multiplexado espacial.
- La cooperación entre usuarios con distintas antenas es mucho más difícil que la cooperación entre las varias antenas que forman parte de una misma estructura.
- CSIT es un requerimiento exigente en el enlace descendente. No obstante, las MU MIMO proporcionan también indiscutibles ventajas tales como:
- Proporcionan diversidad multiusuario, de modo que a través del *scheduler* se pueden elegir en cada ventana temporal los usuarios que presenten los mejores canales de propagación.
- La decorrelación entre antenas está habitualmente asegurada por la decorrelación de las firmas espaciales de los usuarios espacialmente separados.
- Permite multiplexado de usuarios en una misma banda de frecuencias además de la propia paralelización de los MIMOs.
- La posibilidad de que el rango de la matriz \mathbf{H} sea bajo, que puede suceder en los MIMO, es prácticamente despreciable con MU MIMO debido a la decorrelación espacial entre usuarios.
- Mitiga la necesidad de que los móviles tengan múltiples antenas, de hecho bastaría con una antena en los móviles para que una estructura MU MIMO fuera factible.

1.5. Recomendación ITU-R M.1457

El papel del Sector de Radiocomunicaciones es asegurar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y llevar a cabo estudios sin limitar la gama de frecuencias sobre la

base de recomendaciones que son adoptadas por este mismo ente. Las funciones de regulación y de política del sector de radiocomunicaciones a nivel mundial y regional en realizar conferencias de radiocomunicaciones y las asambleas de radiocomunicaciones con el apoyo de las comisiones de Estudio [44].

La ITU está conformada por tres entes de la siguiente manera:

Está compuesta por tres sectores:

- UIT-T: Sector de Normalización de las Telecomunicaciones (antes CCITT).
- UIT-R: Sector de Normalización de las Radiocomunicaciones (antes CCIR).
- UIT-D: Sector de Desarrollo de las Telecomunicaciones de la UIT (nuevo).

El Sector de Radiocomunicaciones de la UIT (UIT-R) se consagra al fomento de la confianza y la seguridad en la utilización de las TIC mediante la creación de un entorno habilitador gracias a la gestión a nivel internacional del espectro de frecuencias radioeléctricas. Dado que la utilización y gestión mundiales de las frecuencias necesita de un alto grado de cooperación internacional, una de las principales tareas del UIT-R es facilitar las complejas negociaciones intergubernamentales necesarias para la conclusión de acuerdos jurídicamente vinculantes entre Estados soberanos. Estos acuerdos están encarnados en el Reglamento de Radiocomunicaciones y en los planes mundiales y regionales adoptados para los distintos servicios espaciales y terrenales [45].

Hoy en día, el Reglamento de Radiocomunicaciones regula las frecuencias entre 9 kHz y 400 GHz, y contiene más de 1.000 páginas de información donde se describe cómo ha de utilizarse el espectro y cómo ha de compartirse en todo el mundo. En un mundo cada vez más «inalámbrico», cerca de 40 servicios de radiocomunicaciones distintos compiten por las atribuciones del espectro necesario para ampliar aplicaciones o soportar un número mayor de usuarios. Al llevar a cabo su misión, el UIT-R pretende crear las condiciones necesarias para el desarrollo armonizado y la utilización eficaz de los sistemas de radiocomunicaciones nuevos y existentes, teniendo debidamente en cuenta a todas las partes concernidas. Además, para la normalización del sector se crean «Recomendaciones» cuyo objetivo es garantizar la necesaria calidad y eficacia del funcionamiento de los sistemas de radiocomunicaciones [46].

Las Recomendaciones UIT-R, constituyen una serie de normas técnicas internacionales desarrolladas por el Sector de Radiocomunicaciones (ex CCIR) de la UIT [47]. Éstas son el resultado de estudios efectuados por las Comisiones de Estudio de Radiocomunicaciones sobre:

- La utilización de una amplia gama de servicios inalámbricos, incluyendo las nuevas tecnologías de comunicación móvil;
- La gestión del espectro de radiofrecuencia y las órbitas de satélite;
- El uso eficaz del espectro de radiofrecuencia por todos los servicios de radiocomunicaciones;
- La radiodifusión terrenal y las radiocomunicaciones por satélite;
- La propagación de las ondas radioeléctricas;
- Los sistemas y las redes para el servicio fijo por satélite, para el servicio fijo y para el servicio móvil;

- Las operaciones espaciales, el servicio de exploración de la Tierra por satélite, el servicio de meteorología por satélite y el servicio de radioastronomía.

Las Recomendaciones UIT-R se aprueban por consenso entre los Estados Miembros de la UIT. Su aplicación no es obligatoria; sin embargo, puesto que éstas son elaboradas por expertos de las administraciones, los operadores, el sector industrial y otras organizaciones dedicadas a las radiocomunicaciones en todo el mundo, disfrutan de una prestigiosa reputación y se aplican a escala mundial. Para este caso se explora una recomendación individual en particular la ITU-R M.1457 ya que esta enmarca características de servicios móviles, radio determinación, aficionados y otros servicios por satélite conexos [48].

Esta recomendación ha sido desarrollada en base a la consideración de los resultados de una evaluación definida de proceso empleados por la UIT-R sobre las IMT-2000, propuestas de radio que han sido presentadas en respuesta a un conjunto de requisitos definidos. Continuo a los requerimientos puestos se le dio a la creación de consenso y reconociendo la necesidad de minimizar el número de interfaces de radio diferentes para maximizar su concordancia teniendo en cuenta como prioridad las necesidades del usuario final, al tiempo que incorpora la capacidad de rendimiento posible en los diversos IMT-2000 de radio entornos operativos. Las revisiones de esta Recomendación han sido desarrolladas conjuntamente por la UIT y la interfaz de radiolas organizaciones de tecnología proponente, proyectos globales de asociación y las organizaciones de desarrollo de normas. Esta Recomendación se complementa con otras Recomendaciones UIT-R y los Informes sobre las IMT-2000 que proporcionan detalles adicionales sobre una serie de aspectos que incluyen disposiciones de frecuencias y las características deseadas de emisiones [49].

Actualizaciones, mejoras y adiciones a las interfaces de radio incorporados en la presente Recomendación tiene sometido a un proceso definido de desarrollo y revisión para garantizar la coherencia con los objetivos originales y objetivos establecidos para las IMT-2000 al tiempo que reconoce la obligación de adaptarse a los cambiantes requerimientos del mercado global. Con la actualización de las tecnologías existentes, la armonización de las interfaces existentes y generando nuevos mecanismos, IMT-2000 se mantiene en la vanguardia de la tecnología de radio móvil [50].

2 Parametrización y análisis de la Red LTE-A a simular

En la parametrización de la red LTE se tuvieron unos aspectos previos con respecto a factores geográficos, altura y calidad del mapa cartográfico de la zona de Bogotá a simular, altura y orientación de las estaciones antenas EnodeB con las que se realizara la triangulación de simulación correspondiente a: perfil, cobertura y multitransmisor los cuales se detallan a continuación. El escenario cartográfico de la zona a trabajar en la simulación es obtenida a partir de una de tantas bitácoras cartográficas presentes en la herramienta Xirio, el cual posee las siguientes propiedades de altimetría descritas en la imagen.

Figura 2-1. Cartografía del estudio aptica.

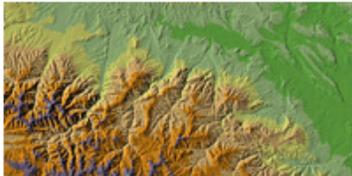
Información ✕

Cartografía del estudio



- **Nombre:** Altimetría mundial
- **Tipo:** MDT
- **Proveedor:** APTICA
- **Incremento en el precio del cálculo:** 0.00 %
- **Coste semanal por tarifa plana:** 0.00 €
- **Coste mensual por tarifa plana:** 0.00 €
- **Resolución:** 100.00 m/pixel
- **Resolución máxima del cálculo gratuito:** 400.00 m/pixel

Descripción:
 Modelo digital de terreno mundial.
 Fuente: Proyecto SRTM de NASA. Año 2006.
 Proveedor: www.aptica.es

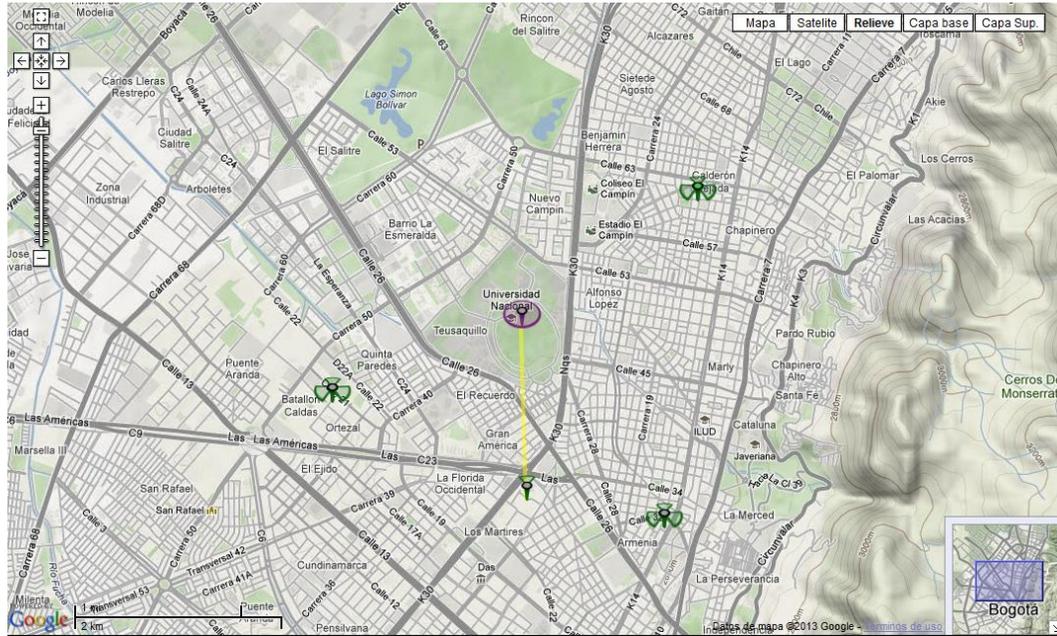


Esta cartografía resulta adecuada para simular cualquier tipo de servicio en entorno rural o semiurbano

- **Áreas:**
 - Área de la capa

La zona del estudio a simular se toma bajo las coordenadas geográficas de la triangulación de tres estaciones LTE ubicadas de la siguiente manera en la localidad de Teusaquillo.

Figura 2-2. Área cartografía ciudad de Bogotá D.C localidad Teusaquillo.



Las coordenadas que triangulan los tres sectores en la localidad de Teusaquillo de la ciudad de Bogotá D.C a simular son las siguientes con sus respectivas descripciones de configuración de nombre, altura, potencia Latitud, Longitud polarización, azimut e inclinación:

Figura 2-3. Coordenadas geográficas de los sectores.

Sector	Sector	Sector
<ul style="list-style-type: none"> Nombre: COB_CENTRO_S3 Latitud: 04°37'11.80"N Longitud: 074°04'15.81"W Altura de la antena: 40.00 m Polarización: Vertical Nombre de antena: 3G/4G Antenna 17,5 dBi 65° Potencia: 300 W Pérdidas: 0.00 dB Frecuencia: 2655 MHz Azimut 0.00 Inclinación 0.00 	<ul style="list-style-type: none"> Nombre: COB_NORTE_S2 Latitud: 04°38'54.47"N Longitud: 074°04'05.24"W Altura de la antena: 40.00 m Polarización: Vertical Nombre de antena: 3G/4G Antenna 17,5 dBi 65° Potencia: 300 W Pérdidas: 0.00 dB Frecuencia: 2655 MHz Azimut 240.00 Inclinación 0.00 	<ul style="list-style-type: none"> Nombre: COB_SUR_S1 Latitud: 04°37'51.37"N Longitud: 074°06'00.22"W Altura de la antena: 40.00 m Polarización: Vertical Nombre de antena: 3G/4G Antenna 17,5 dBi 65° Potencia: 300 W Pérdidas: 0.00 dB Frecuencia: 2655 MHz Azimut 120.00 Inclinación 0.00

2.1. Estudio de Perfil de la localidad de Teusaquillo Bogotá D.C

Este estudio permite determinar la cobertura radioeléctrica que alcanza una red de estaciones. Consiste en una combinación de estudios de coberturas simples. Un perfil es un estudio radioeléctrico que analiza la disminución de la señal eléctrica en una línea que une un transmisor con un receptor. Mediante este cálculo se puede verificar si existe visión directa entre el transmisor y el receptor, si está libre la primera zona de Fresnel y el nivel de señal recibido en todos los puntos del trayecto. Para llevar a cabo un estudio de tipo perfil en Xirio Online es necesario que estén configurados los siguientes parámetros:

Figura 2-4. Parámetros LTE del sector.

Propiedades del sector

Sector	Parámetros LTE		
Nombre: SECTOR_LTE	Los siguientes parámetros son específicos para la realización de la estimación individual de cobertura. No se aplicarán al realizar un análisis detallado de capacidad/coertura de toda la red LTE.		
Emplazamiento Coordenadas Latitud: 0.0 Longitud: 0.0	Etiqueta ICIC estático: PSS ID 1 Eficiencia ICIC dinámico: 50 % Configuración de frame: Configuración 0 (2:3)		
Parámetros de radio Antena copolar: 3G/4G Antenna 17,5 dBi Frecuencias de transmisión <table border="1"> <thead> <tr> <th>Frecuencias</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2655.000 MHz</td> </tr> </tbody> </table> Polarización: Vertical Altura antena: 30 m Orientación: 0 [0,359] Inclinación: 0 [-90,90] Potencia: 300 W Pérdidas: 0 dB	Frecuencias	2655.000 MHz	Parámetros Downlink: Pot. canal piloto: 1.6 W Potencia de canales de control: 4.8 W Distribución potencia por ICIC: Partial frequency Potencia en borde de celda: 50 % Carga de tráfico: 50 %
Frecuencias			
2655.000 MHz			
	Parámetros Uplink: Incremento de ruido: 3 dB Objetivo SINR (control de potencia): -3 dB Alpha (control de potencia): 1 Factor de ruido: 2 dB Ancho de banda: 10 MHz Sensibilidad: -123.4 dBm Calcular sensibilidad		

En función del tipo de trayecto (ascendente o descendente) que se pretenda simular se utilizarán en el cálculo o bien los parámetros *Downlink* o *Uplink* especificados en los parámetros LTE.

- **Etiqueta ICIC estático:** El principal objetivo de la coordinación de interferencia intercelular (*inter-cell interference coordination*, ICIC) es evitar altas interferencias debidas a usuarios ubicados en los bordes de las celdas adyacentes. La etiqueta ICIC estática define el grupo de recursos que una estación base dedica a los usuarios en el borde de la celda, de este modo dos estaciones que comparten la misma etiqueta de ICIC estático dedican los mismos recursos a estos usuarios.

Cuando se están simulando estaciones sectoriales cada uno de los sectores deberá utilizar una etiqueta de ICIC estático diferente.

- **Eficiencia ICIC dinámico (%):** En lugar de una gestión estática de los recursos es posible que está se haga de forma totalmente dinámica. Esto supone una mejora de la interferencia intercelular presente en las comunicaciones. La eficiencia de ICIC dinámico define esta reducción de la interferencia tomando valores desde el 0% (toda la señal se considera interferente) hasta el 100% (no hay interferencia).

- **Potencia de canal piloto:** Potencia destinada a la señal piloto del sector.

- **Potencia de canales de control:** Potencia destinada al canal de control.

- **Distribución potencia por ICIC:** El usuario puede simular los siguientes esquemas de reutilización de frecuencias:

Figura 2-5. Reutilización de factor 1 (Frequency Reuse of 1, FR1).

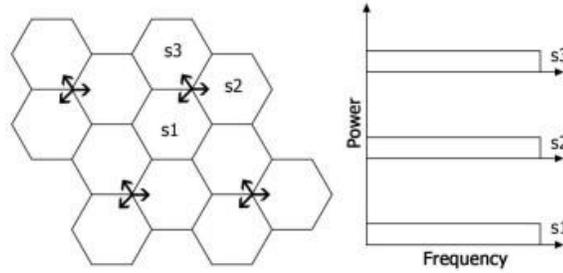
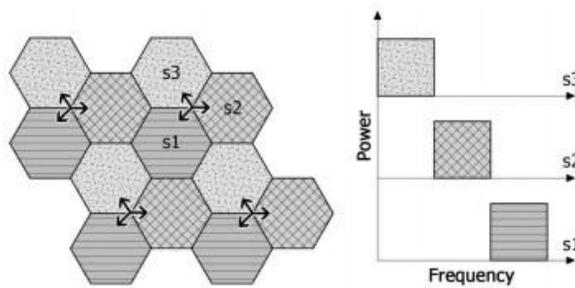
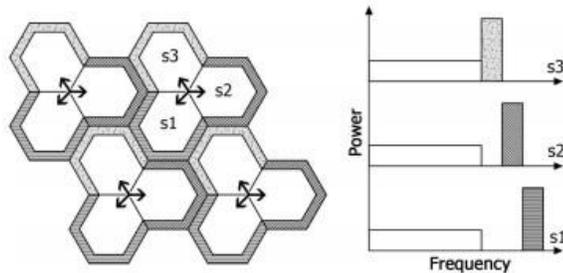
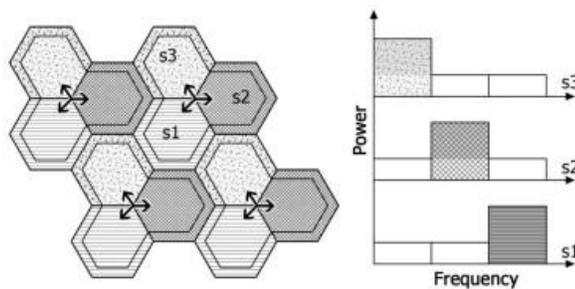
Figura 2-6. Reutilización de factor 3 (Frequency Reuse of 3, FR3)³⁴Figura 2-7. Reutilización parcial de frecuencias (Partial Frequency Reuse, PFR); **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 2-8. Reutilización soft de frecuencias (Soft Frequency Reuse, SFR).

³⁴ Tomado de: <http://www.xirio-online.com/>

- **Potencia en borde de celda (%)**: Este parámetro establece la cantidad de potencia dedicada a los recursos destinados a los usuarios ubicados en el borde la celda.

- **Carga de tráfico (%)**: Define el porcentaje utilizado del total de los recursos disponibles en el sector. Sirve para modelar el efecto de la interferencia intercelular producido entre las estaciones. En Xirio Online se ofrecen resultados para tres escenarios de estudio:

- Estaciones sin carga (0%).
- Estaciones con carga definida por el usuario.
- Estaciones a plena carga (100%).

Para el cálculo de la interferencia SINR *Xirio-Online* utiliza este parámetro. Si el usuario no dispone de estimaciones de este valor es recomendable configurarlo al 100% para situarse en el peor de los casos. Tras la realización de un cálculo de capacidad el usuario obtendrá valores de carga de tráfico que permitirán realimentar el cálculo de interferencia SINR y obtener una mancha definitiva de cobertura.

- **Incremento de ruido**: Este parámetro cuantifica la interferencia recibida en la estación base en el sentido ascendente.

- **Objetivo SINR y α (control de potencia)**: La potencia transmitida por el terminal móvil se limita, debido a un mecanismo de control de potencia, a un valor de $P_0 + \alpha \cdot PL_{DL}$, donde PL_{DL} son las pérdidas en el trayecto, α es el factor de compensación de estas pérdidas y P_0 es la potencia deseada en la estación base que se obtiene a partir de la SINR objetivo definida por el usuario.

Un valor de α igual a 1 implica una compensación total de las pérdidas en el trayecto y por tanto, mientras que el terminal móvil pueda proporcionar esa potencia, el valor de SINR será igual al objetivo.

- **Factor de ruido (dB)**. Factor de ruido del sector.

- **Ancho de banda**: El ancho de banda total de LTE dedicado al enlace ascendente. En el caso de TDD este ancho de banda debe coincidir con el definido en los parámetros LTE del terminal móvil para el enlace descendente.

- **Sensibilidad (dBm)**: Potencia necesaria en recepción, se calcula a partir de los parámetros siguientes al pulsar el enlace "**Calcular sensibilidad**".

- **Ancho de banda efectivo**: En el enlace ascendente de LTE el ancho de banda total de transmisión se comparte dinámicamente entre los usuarios. En el balance de enlace es preciso suponer un ancho de banda fijo para el servicio considerado. Este ancho de banda debe ser múltiplo de 180 kHz, que es la ocupación espectral de un bloque de recursos (*resource block*), el cual representa la unidad mínima de asignación de ancho de banda en LTE.

- **SINR necesaria (dB)**: El valor de la relación señal a ruido más interferencia (SINR) se obtiene a partir de simulaciones de enlace o de medidas. Depende de los formatos de transmisión (modulación y codificación) utilizados, de la tasa binaria considerada y del ancho de banda utilizado para el servicio. Por ejemplo, un mismo servicio con una tasa binaria dada podrá prestarse con menor SINR si se dispone de más ancho de banda para dicho servicio, ya que podrán utilizarse formatos de transmisión más robustos. La SINR necesaria tiene en cuenta la sobrecarga introducida por los canales de control

transmitidos en sentido ascendente (igual que ocurre con la E_B/N_0 en el caso de UMTS). Asimismo, la ganancia por diversidad de antena se considera, en su caso, incluida en el valor de SINR.

Se caracteriza en esta sección factores como potencia del transmisor, orientación, frecuencia, ancho de banda, y características particulares de radio características propias de esta tecnología LTE. Luego de definir los lineamientos del transmisor se define los correspondientes del terminal receptor o llamado UE correspondiente a la gráfica presentada a continuación.

Figura 2-9. Propiedades del terminal UE.

Propiedades del terminal

Terminal

Nombre: Terminal_UE

Emplazamiento

Coordenadas

Latitud: 0.0

Longitud: 0.0

Parámetros de radio

Antena copolar: 3G/4G Antenna 2 dBi Om

Polarización: Vertical

Altura antena: 1.5 m

Orientación: 0 [0,359]

Inclinación: 0 [-90,90]

Pérdidas: 3 dB

Discriminación 45°: 0

Discriminación 90°: 0

Potencia de transmisión: 23 dBm

Frecuencias de transmisión:

Frecuencias
2535.000 MHz

Parámetros LTE

Los siguientes parámetros son específicos para la realización de la estimación individual de cobertura. No se aplicarán al realizar un análisis detallado de capacidad/coertura de toda la red LTE

Parámetros Downlink:

Factor de ruido: 7 dB

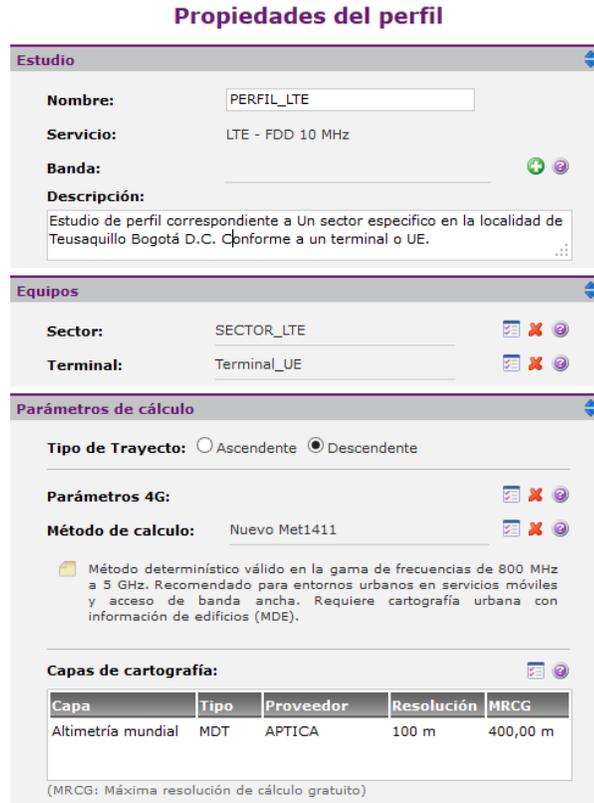
Ancho de banda: 10 MHz

Sensibilidad: -106.5 dBm

> [Calcular sensibilidad](#)

Las características relevantes del terminal UE son altura de la antena, potencia del transmisor, frecuencia del transmisor, parámetros de radio en general y factores de Downlink o Uplink propios de la tecnología LTE.

Figura 2-10. Propiedades de perfil.



Las características generales de este escenario de simulación se reflejan en la gráfica anterior que comprende la definición de los equipos Sector y Terminal para la realización del cálculo en particular. Los parámetros del cálculo como el tipo de trayecto se podrá simular Uplink o Downlink, en este caso se define Downlink ya que la finalidad en esta simulación es analizar el factor descendente del cálculo.

2.2. Modelo de propagación a implementar en la simulación de la localidad de Teusaquillo Bogotá D.C

El método del cálculo se define bajo las condiciones particulares de la geografía Colombiana en este caso la localidad de Teusaquillo Bogotá D.C. El modelo de propagación seleccionado para esta simulación fue Modelo MET1411. El método propuesto es determinístico válido en la gama de frecuencias de 800 MHz a 5 GHz. Recomendado para entornos urbanos en servicios móviles y acceso de banda ancha. Requiere cartografía urbana con información de edificios (MDE). Resulta aplicable a los siguientes entornos.

- Celdas grandes y pequeñas: La antena de la estación base se sitúa por encima de los tejados de los edificios, en cuyo caso las pérdidas de propagación están determinadas principalmente por la difracción y la dispersión en los tejados de los edificios cercanos al móvil.
- Microceldas: La estación base está situada por debajo de los tejados de los edificios, estando entonces determinada la propagación por la difracción y la dispersión alrededor de los edificios, es decir, los rayos principales se propagan en las calles de modo similar a como lo harían en una guía de onda.

Figura 2-11. Propiedades del método de cálculo.

Propiedades del método de cálculo

Método de cálculo

Nombre:

Método de propagación:

☑ Método determinístico válido en la gama de frecuencias de 800 MHz a 5 GHz. Recomendado para entornos urbanos en servicios móviles y acceso de banda ancha. Requiere cartografía urbana con información de edificios (MDE).

Resolución: m/pixel

Parámetros básicos

Factor K:

Margen de desvanecimiento:

Propiedades Met 1411

Penetración en edificios

No calcular en edificios

Receptor ubicado en azoteas

Pérdidas fijas en interiores dB

Tipo de terreno

Ciudades de tamaño medio y entornos suburbanos con densidad moderada de vegetación

Centros metropolitanos

Este método determinístico es recomendado en la gama de frecuencias de 800 MHz a 2 GHz. Además es de gran confianza para entornos urbanos en servicios móviles y acceso de banda ancha.

2.3. Estudio de Cobertura de la localidad de Teusaquillo Bogotá D.C

Este estudio representa valores de la señal impuesta por un transmisor, en términos de campo eléctrico o potencia, en todos los puntos dentro del área seleccionada por el usuario.

Figura 2-12. Estudio de cobertura.

Crear nuevo estudio

Seleccione un tipo de estudio

<ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> Perfil <input checked="" type="radio"/> Cobertura <input type="radio"/> Cobertura multitransmisor <input type="radio"/> Red de transporte <input type="radio"/> Altura efectiva 	<p>Estudio de cobertura:</p> <p>Este estudio representa valores de la señal impuesta por un transmisor, en términos de campo eléctrico o potencia, en todos los puntos dentro del área seleccionada por el usuario.</p> <p>Leer más</p>
--	--

Seleccione un servicio o tecnología

Categoría:

Subcategoría:

Servicio:

Para este estudio simulado se crearon tres estaciones transmisoras cada una con una cobertura de 360 grados, ubicados en tres puntos de la localidad de Teusaquillo Bogotá. La vocación de estos transmisores se verificó por medio de la cartografía provista por el software cartográfico el cual realiza el cálculo correspondiente a ubicar en la mejor altura del sector para que su transmisión y cobertura sea

la mejor. El servicio que se simulara será un canal de 10 MHz FDD, siendo el servicio ideal para un operador móvil en la tecnología LTE.

La ubicación precisa en la cartografía de Bogotá se realizó a partir de coordenadas reales de Longitud y latitud tomadas a partir de la altimetría del mapa. Para el sector Sur se definió la siguiente configuración y posición.

Figura 2-13. Propiedades de emplazamiento de sector

The screenshot shows a configuration window titled "Propiedades del sector". It is divided into two main sections: "Sector" and "Emplazamiento".

- Sector:** The "Nombre:" field contains the text "COB_SUR_S1".
- Emplazamiento:** This section includes a "Coordenadas" label with several small icons (a location pin, a refresh symbol, a mobile phone, a globe, and a location pin). Below this, the "Latitud:" field is set to "04°37'51.37"N" and the "Longitud:" field is set to "074°06'00.22"W".

Los parámetros de radio definidos a partir de las condiciones recomendada por ITU-R con la finalidad de ofrecer el mejor servicio y mejor cobertura del sector donde se encuentra el transmisor.

Figura 2-14. Parámetros de radio del sector.

The screenshot shows a configuration window titled "Parámetros de radio". It contains several fields for radio parameters:

- Antena copolar:** Set to "3G/4G Antenna 17,5 dBi".
- Frecuencias de transmisión:** A table with one entry: "2655.000 MHz".
- Polarización:** A dropdown menu set to "Vertical".
- Altura antena:** A text input field set to "40" with "m" as the unit.
- Orientación:** A text input field set to "120" with a range of "[0,359]".
- Inclinación:** A text input field set to "0" with a range of "[-90,90]".
- Potencia:** A text input field set to "300" with a unit dropdown set to "W".
- Pérdidas:** A text input field set to "0" with a unit dropdown set to "dB".

Los siguientes parámetros son específicos para la realización de la estimación individual de cobertura. No se aplicarán al realizar un análisis detallado de capacidad/cobertura de toda la red LTE ya que la finalidad de este estudio es evaluar el alcance, calidad caracterización geográfica de la cobertura a simular.

Figura 2-15. Parámetros LTE específicos de sector.

Parámetros LTE

Los siguientes parámetros son específicos para la realización de la estimación individual de cobertura. No se aplicarán al realizar un análisis detallado de capacidad/coertura de toda la red LTE

Etiqueta ICIC estático: PSS ID 1

Eficiencia ICIC dinámico: 50 %

Configuración de frame: Configuración 0 (2:3)

Parámetros Downlink:

Pot. canal piloto: 1.6 W

Potencia de canales de control: 4.8 W

Distribución potencia por ICIC: Partial frequency

Potencia en borde de celda: 50 %

Carga de tráfico: 50 %

Parámetros Uplink:

Incremento de ruido: 3 dB

Objetivo SINR (control de potencia): -3 dB

Alpha (control de potencia): 1

Factor de ruido: 2 dB

Ancho de banda: 10 MHz

Sensibilidad: -109 dBm

[► Calcular sensibilidad](#)

Un factor particular del estudio a simular es el posible cálculo de (SNIR *Signal to Noise Ration*) que refiere a un método para cuantificar de mejor manera la calidad de un canal de transmisión en su relación señal ruido. El cual bajo la tecnología que se use como OFDMA el enlace se adaptara a las condiciones acotadas de SNR. El Análisis estático de interferencia SINR. Inicialmente la carga de tráfico soportada por cada estación base no es conocida. De este modo se realiza un análisis estático de interferencia SINR a partir de la carga de tráfico configurada en los parámetros LTE de los sectores.

Figura 2-16. Cálculos de sensibilidad SNIR.

Calcular sensibilidad

SINR necesaria: -7 dB

Ancho de banda efectivo: 10 MHz

Los parámetros 4G engloban un conjunto de variables que intervienen en el cálculo de las pérdidas de propagación. Xirio Online configura automáticamente estos parámetros por defecto en función del servicio radioeléctrico seleccionado.

Figura 2-17. Selección de cartografía del estudio y método de cálculo.

Selección de cartografía del estudio y método de cálculo

Parámetros de cálculo

Tipo de Trayecto: Ascendente Descendente

Parámetros 4G:

Método de cálculo: Nuevo Met1411

Capas de cartografía:

Capa	Tipo	Proveedor	Resolución	MRCG
Altimetría mundial	MDT	APTICA	100 m	400,00 m

(MRCG: Máxima resolución de cálculo gratuito)

La sectorización y configuración en la estación transmisora Sur quedaría de la siguiente manera.

Figura 2-18. Sectorización del transmisor.

Sectorización de transmisor

Sectorización

Sectorizar estudio

Número de sectores: 3

Azimut del primer sector: 120 Recalcular

Antena sectorial: 3G/4G Antenna 17

Nombre	Tx	Azimut	Inclinación
COB_SUR_S1	COB_SUR_S1	120	0
COB_SUR_S2	COB_SUR_S2	240	0
COB_SUR_S3	COB_SUR_S3	0	0

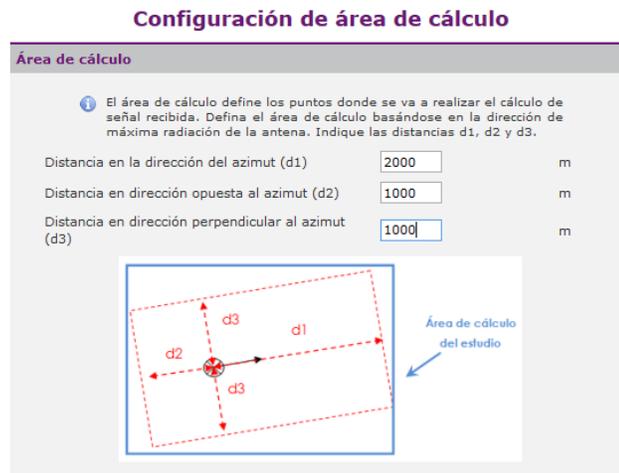
El resultado de del estudio de cobertura es una mancha de transparencia en el mapa formada por múltiples colores los cuales representan el nivel de señal disponible en cada punto como lo muestra la figura a continuación.

Figura 2-19. Configuración de los rangos de señal.



El área de cálculo define los puntos donde se va a realizar el cálculo de señal recibida. Defina el área de cálculo basándose en la dirección de máxima radiación de la antena. Configurándose de la siguiente manera bajo los lineamientos de una antena para telefonía móvil de tecnología 4G.

Figura 2-20. Configuración del área de cálculo.



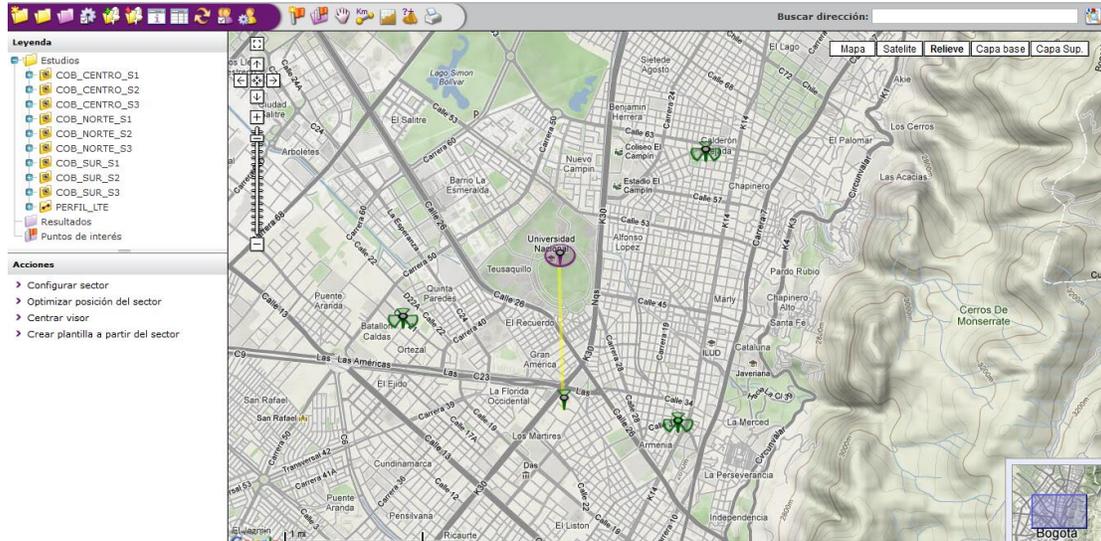
Para las otras dos estaciones (Centro, Sur, Norte) de las tres estaciones transmisoras sería su variación a su posición cartográfica en coordenadas Latitud, Longitud:

Figura 2-21. Coordenadas cartográficas de los sectores.

Propiedades del sector	Propiedades del sector	Propiedades del sector
Sector Nombre: <input type="text" value="COB_NORTE_S2"/>	Sector Nombre: <input type="text" value="COB_CENTRO_S3"/>	Sector Nombre: <input type="text" value="COB_SUR_S1"/>
Emplazamiento Coordenadas Latitud: <input n"="" type="text" value="04°38'54.47"/> Longitud: <input type="text" value="074°04'05.24" w"=""/>	Emplazamiento Coordenadas Latitud: <input n"="" type="text" value="04°37'11.80"/> Longitud: <input type="text" value="074°04'15.81" w"=""/>	Emplazamiento Coordenadas Latitud: <input n"="" type="text" value="04°37'51.37"/> Longitud: <input type="text" value="074°06'00.22" w"=""/>

La descripción grafica de la ubicación de los transmisores en la cartografía de la ciudad de Bogotá para realizar estudio de cobertura se refleja en la siguiente imagen.

Figura 2-22. Descripción geográfica simulación.



Los resultados de cobertura se muestran el punto 4 de Evaluación de desempeño de la red LTE.

2.4. Estudio de Cobertura Multitransmisor de la localidad de Teusaquillo Bogotá D.C

Este estudio permite determinar la cobertura radioeléctrica que alcanza una red de estaciones. Consiste en una combinación de estudios de coberturas simples.

Figura 2-23. Propiedades de cobertura multitransmisor.



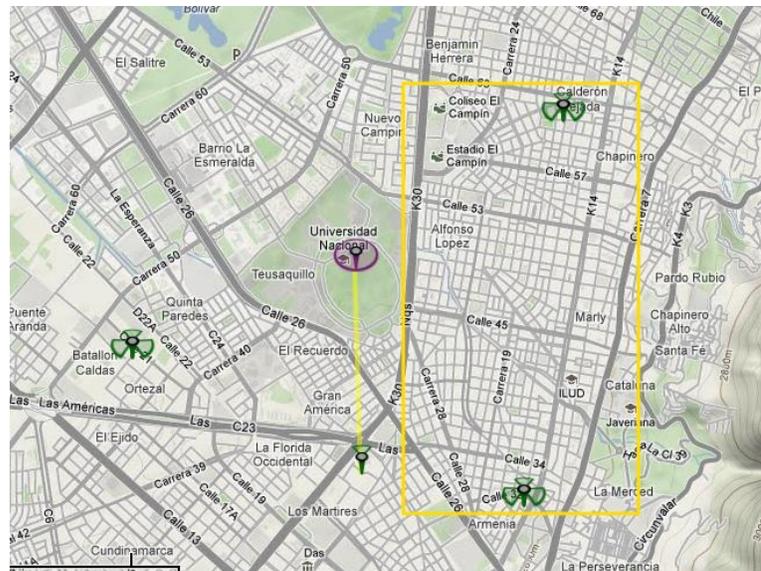
El área de cálculo se comprende de cuatro puntos cardinales en el mapa resaltado en un rectángulo de color amarillo, correspondiente a dos sectores ubicados en las coordenadas de los sectores CENTRO

y NORTE, cubriendo un área aproximada de 3 Km². Con una ubicación del estudio representada en la siguientes dos figura.

Figura 2-24. Coordenadas de cálculo multitrasmisor.

Área del cálculo		
	Latitud	Longitud
Esquina NorOeste	04°39'04.31"N	074°04'47.52"W
Esquina SurEste	04°37'09.74"N	074°03'44.79"W

Figura 2-25. Área de cálculo multitrasmisor.



2.5. Trafico de ruido de la señal (SNIR)

Parámetros específicos de la red LTE. Para obtener una mancha de señal estática basada en balances de enlaces basta con definir algunos parámetros de los sectores, sin embargo, para realizar un cálculo de interferencias es necesario establecer cómo se interrelacionan las estaciones de la red entre sí.

En los parámetros de LTE del estudio de cobertura multitrasmisor se configuran estos parámetros específicos. También es necesario configurar algunos parámetros de los sectores y del terminal móvil que no son necesarios en el cálculo básico de señal. En caso de utilizar ICIC estático a la hora de parametrizar las estaciones será necesario configurar cada sector con una etiqueta de ICIC estático diferente. De este modo se consigue mitigar el efecto de la interferencia intercelular.

3 Evaluación del Desempeño la Red LTE-A Simulada

Los resultados obtenidos en la evaluación constan de los datos alcanzados bajo el escenario configurado en la parametrización y análisis de la red LTE correspondiente a los estudios definidos en el punto tres de este documento el cual se detallan a continuación con respecto a

3.1. Evaluación de estudio de perfil.

Las características de este estudio al realizar la simulación se debe orientar la antena hacia para que apunte al transmisor y viceversa con el fin de tener una línea de vista lo suficientemente clara para tener una transmisión y recepción bajo parámetros deseados. Los datos de inclinación y azimut correspondientes a estos dos dispositivos se refleja en la siguiente imagen. Figura 4-1.

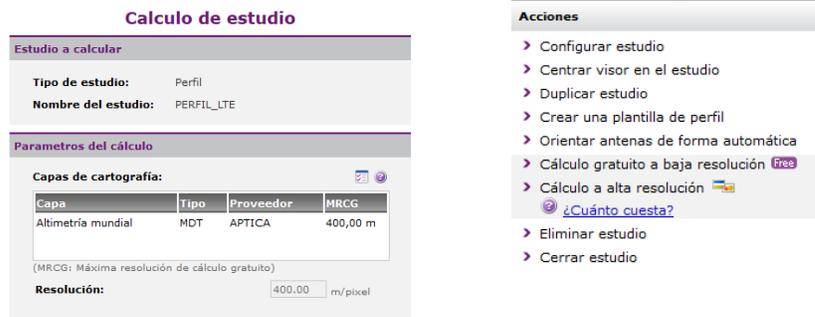
Figura 3-1. Inclinación de la antena.



En un perfil como tal es un estudio radioeléctrico que analiza la disminución de la señal eléctrica en este caso una señal OFDMA bajo la configuración de la tecnología LTE-A en una línea que une un transmisor con un receptor de manera correspondiente.

Las posibles opciones de configuración son suficientes para obtener datos reales bajo este escenario de simulación en la cartografía de la ciudad de Bogotá D.C en la localidad de Teusaquillo. Correspondiente al cálculo radioeléctrico se presentan dos opciones, una en baja resolución la cual es lo suficientemente clara para tomarlo como resultado de estudio el cual se calcula en las condiciones configuradas en el punto 3.1. La segunda opción refiere a un cálculo a alta resolución de manera que tiene un costo de suscripción.

Figura 3-2. (a) Cálculo de estudio de perfil (b) Acciones de configuración.



El cálculo de estudio de perfil se genera a partir de la tarea ejecutada la cual muestra el proceso en porcentaje de la actividad ejecutada, si el proceso de configuración se realizó satisfactoriamente el panel de tareas reflejara el estado de finalizado con un progreso de 100%. Mostrado en la figura 4-3.

Figura 3-3. Tarea de cálculo estudio perfil.

Tarea	Estado	Progreso	Acciones
Calculando estudio: PERFIL_LTE	Finished	100.00 %	<input type="checkbox"/>

Las condiciones de simulación fueron de carácter desendente, en la grafica 3-24 se muestra el nivel de señal que se encuentra sobre el umbral de recepción mostrando una curvatura del nivel de señal de color azul con una cota promedio de 1600m, un nivel de 50 dBm y una distancia aproximada de 2000 mts entre en receptor y terminal de mostrado de tal manera que a mas distancia el nivel de señal se tendera a degradar. Figura 4-4.

Figura 3-4. Resultado cálculo estudio perfil.



Las condiciones orograficas o de elevacion del suelo en la localidad de Teusaquillo en Bogota D.C son provistas por la NASA, según descrito en las características cartograficas usadas en este perfil de estudio.

3.2. Evaluación estudio de cobertura

Las características de evaluación de cobertura se realizan seleccionando primero el sector correspondiente en la antena transmisora, en este caso tomaremos la antena de cobertura llamada “COB_SUR_S1” en la que se reflejan tres sectores en la misma que cubren 360° grados en la ubicación cartográfica descrita en el punto 3.3 de este documento.

El área de cobertura se define con respecto al área que se quiere evaluar según el tipo de sub-estudio a realizar ya sea por distancia, por nivel de señal o nivel de interferencia. En este caso se realizara el estudio por distancia y evaluar puntos en particular de la localidad de Teusaquillo para observar el alcance de distancia y señal del transmisor. Figura4-26.

Figura 3-5. Ajustes de área calculados.

Ajuste automático de áreas

Ajuste de área de cálculo

El ajuste automático de área necesaria para los cálculos de nivel de señal o interferencia realiza una estimación aproximada de la distancia máxima alcanzada por cada transmisor en las distintas direcciones (radiales cada 10°). Esta estimación se realiza utilizando la cartografía seleccionada en el estudio a la resolución máxima de cálculo gratuito (RMCG) y el método de cálculo específico de cada estudio.

Ajustar área del cálculo de las coberturas del estudio

Ajuste por distancia
Radio Km

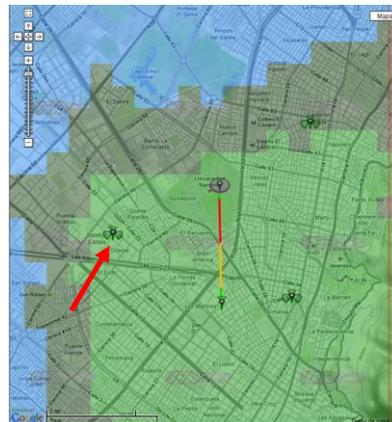
Ajuste por nivel de señal
Magnitud Campo Potencia
Nivel de Señal dBm

Ajuste por nivel de interferencia
Magnitud Campo Potencia
Nivel de Interferencia dBm

Distancia máxima de ajuste Km

La descripción de cobertura del transmisor costado sur genera un espectro de cobertura en cual según lo delimitado en el estudio se muestra bajo un marco de color rojo como lo muestra la figura 4-6.

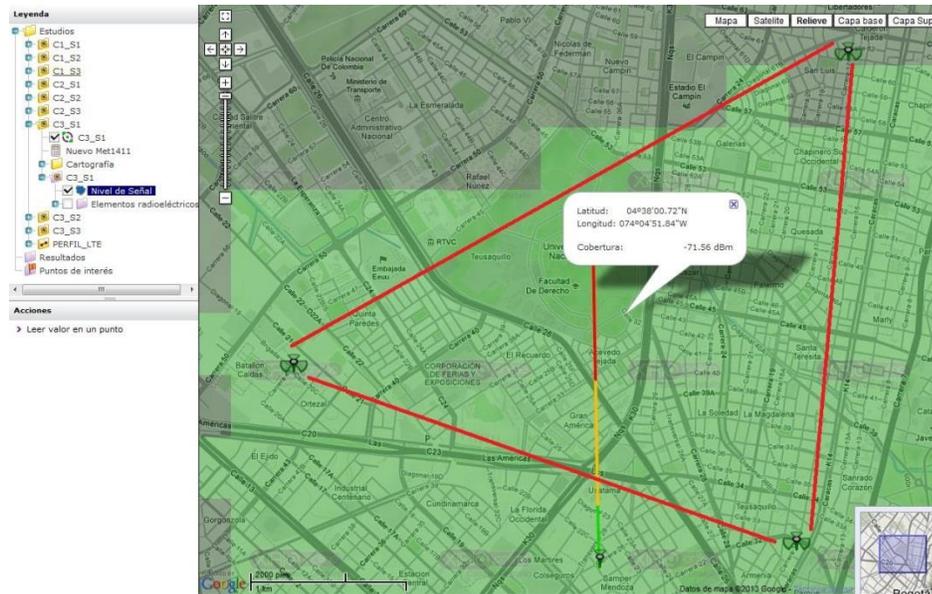
Figura 3-6. Area de cobertura.



Las zonas coloridas de color verde reflejan el sector que cubre la estación sur que se orientada hacia zona de Teusaquillo corresponde el área que comprende en cobertura de calidad de la señal óptima entre los -86.50 dBm al infinito.

En tres puntos tomados al azar bajo el área de cobertura con mejor recepción se denota una calidad promedio de entre los -70 dBm y -80 dBm teniendo en cuenta la orientación de la antena, distancia calculada y altura aproximada del punto leído a calcular en ese momento, la triangulación resaltada en las líneas rojas enmarcan el área de estudio en particular. Figura 4-7.

Figura 3-7. Valor de cobertura en un punto.



Con una distancia aproximada de 2000 Mts y un azimut de inclinación de la antena de 84.06° correspondiente al cálculo obtenido del área aproximada donde se obtuvo un rango de cobertura de -71.56 dBm. Figura 4-29.

Figura 3-8. Distancia y Azimut.



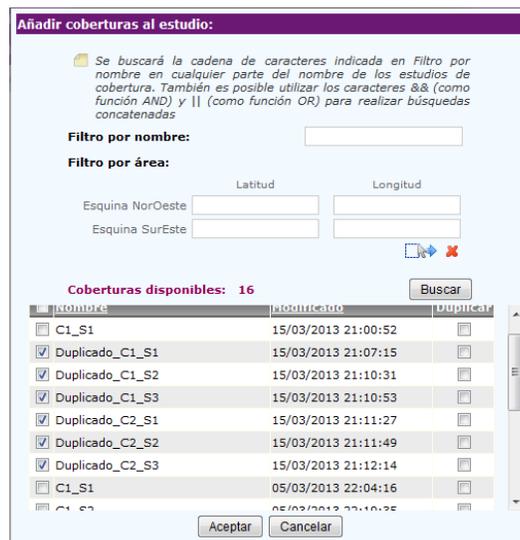
3.3. Evaluación estudio multitransmisor.

Este estudio permite determinar la cobertura radioeléctrica que alcanza una red de estaciones. Consiste en una combinación de estudios de coberturas simples. Permite realizar varios tipos de cálculo:

- Cobertura radioeléctrica que alcanza una red de estaciones.
- Estadísticas de superficie y población cubiertos.
- Cálculo de interferencias (relación portadora/interferencia C/I).
- Cálculo de capacidad (sólo servicios LTE).

Por motivos de que ya tenemos presente las estaciones pre-configuradas se realizaron una copia de las mismas para el fin de realizar la correspondiente simulación multitransmisor.

Figura 3-9. Coberturas de estudio Multitransmisor.



Se crea a continuación un entorno para simular las características de un escenario de cuatro usuarios o terminales UE correspondientes a las condiciones de la tecnología LTE-A.

Figura 3-10. Entorno terminales UE.



Las características de pre-configuración se definen con una serie de parámetros ya establecidos bajo las mejores condiciones sobre la tecnología usada en el estudio seleccionado. En particular se describe en la figura 4-32 las características de configuración de los terminales UE.

Figura 3-11. Configuración terminales UE.

Terminal

Terminal

Nombre

Tipo de terminal

Garantizado

Datos por sesión DL Mbits

Sesiones por hora DL

Datos por sesión UL Mbits

Sesiones por hora UL

Curva Eficiencia Espectral DL

Curva Eficiencia Espectral DL con MIMO

Curva Eficiencia Espectral UL

Antena 3G/4G Antenna 2 dBi Omni

Velocidad media km/h

Potencia dBm

Factor de ruido dB

Pérdidas dB

Una de las características particulares de este estudio es la posibilidad de parametrizar características de eficiencia en los terminales UE para tener el mejor rendimiento del espectro asignado en ese momento como la curva de eficiencia espectral de descarga Down Load.

Figura 3-12. Curva eficiencia espectral terminales UE.

Curva eficiencia espectral

Curva eficiencia espectral

Curvas por defecto

Factor AB

Factor SINR

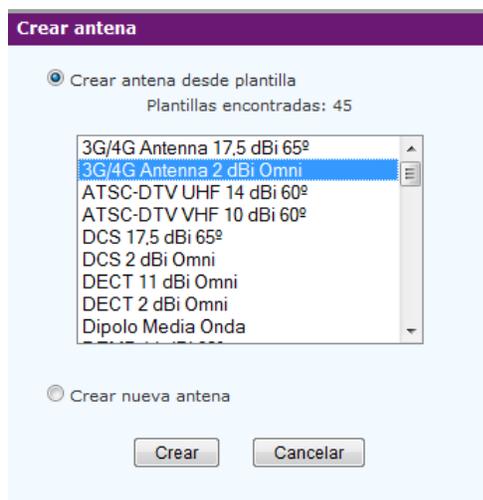
Ganancia de array dB

SINR mínimo dB

Throughput máximo bps/Hz

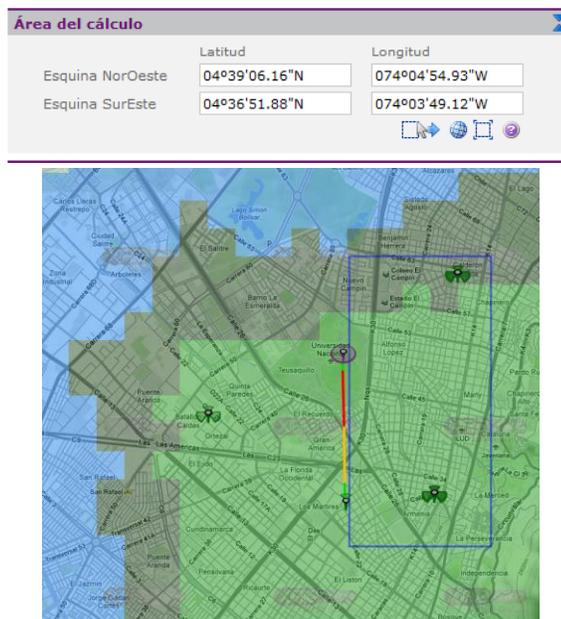
Las antenas son posibles crearas con parámetros personalizados o en su medida crearlas bajo las plantillas que presenta el estudio de Xirio, en este caso se asigna una antena omnidireccional para efectos de cobertura en 360°.

Figura 3-13. 3G/4G Antena 2dBi Omni.



El área de cálculo refiere el sector donde se delimita el estudio multitrasmisor ubicado entre las estaciones norte y centro de la simulación marcadas en un rectángulo de color azul.

Figura 3-14. Area de cálculo Multitrasmisor.



Los parámetros de la configuración LTE se reflejan de la siguiente manera definiendo características bajo el umbral de otras celdas, capacidad máxima de usuarios canales de control tanto de descarga como de carga. Figura 4-15.

Figura 3-15. Parámetros LTE Multitransmisor.

Parámetro	Valor	Unidad
Planificador:	Proportional Fair (PF)	
Tipo ICIC:	Estático	
Umbral borde de celda:	6	dB
Capacidad máxima por usuario:	30	%
MIMO activo:	Activo	
Ancho de banda canales de control DL:	30	%
Ancho de banda canales de control UL:	30	%
Ancho de banda centro de celda (PFR):	25	%

Se describen los parámetros correspondientes al escenario del estudio multitransmisor el cual utiliza el método configurado inicialmente para realizar el estudio correspondiente de cobertura en el área seleccionada. La señal interferente de cada transmisor se calculará siempre con el método de cálculo seleccionado en su estudio de Cobertura (método principal). Adicionalmente, también es posible utilizar un método secundario específico para interferencias, estimándose la interferencia provocada por el transmisor como el valor máximo de los obtenidos con ambos métodos.

Las coberturas interferentes de otras redes son aquellas de transmisores que no proporcionan servicio ya que no pertenecen a la red en estudio, pero si pueden generar interferencia. La estimación de esta interferencia se calcula utilizando el método de cálculo específico de cada estudio de cobertura interferente.

El factor de rechazo especifica cómo afecta una señal interferente en función del servicio radioeléctrico, separación en frecuencia, Figura 4-16.

Figura 3-16. Parámetros de interferencia Multitransmisor.

Cálculo de Interferencias de Coberturas de Red

Utilizar el método de cálculo de los estudios de cobertura (método principal)

Utilizar un método de cálculo adicional específico para interferencias (método secundario)

Método de cálculo secundario:

La señal interferente de cada transmisor se calculará siempre con el método de cálculo seleccionado en su estudio de Cobertura (método principal). Adicionalmente, también es posible utilizar un método secundario específico para interferencias, estimándose la interferencia provocada por el transmisor como el valor máximo de los obtenidos con ambos métodos.

Coberturas interferentes de otras redes:

Nombre
El estudio no tiene ninguna cobertura interferente asociada

Las coberturas interferentes de otras redes son aquellas de transmisores que no proporcionan servicio ya que no pertenecen a la red en estudio, pero si pueden generar interferencia. La estimación de esta interferencia se calcula utilizando el método de cálculo específico de cada estudio de cobertura interferente.

Factores de rechazo:

Nombre	Señal Interferida	Señal Interferente
Nuevo factor de rechazo	LTE - TDD 5 MHz	LTE - TDD 5 MHz

El factor de rechazo especifica cómo afecta una señal interferente en función del servicio radioeléctrico, separación en frecuencia, etc.

Los rangos de señal permiten establecer diferentes rangos de nivel de señal interferentes y SINR. A cada intervalo se le asigna un color para la posterior visualización de los resultados.

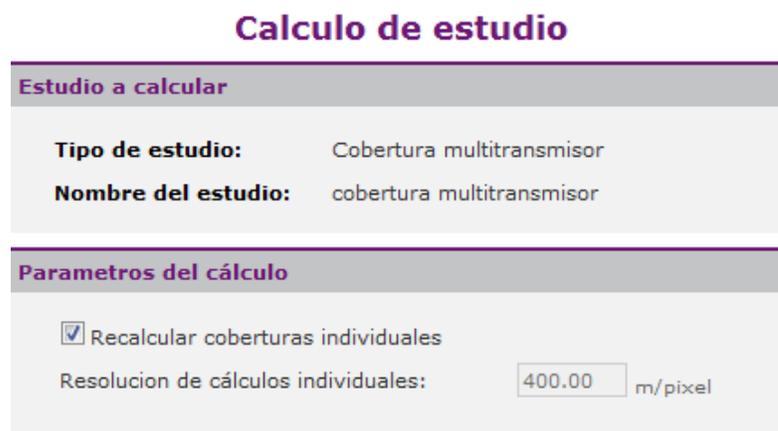
Al desplegar la tabla, que aparece oculta por defecto, aparecen tres intervalos. Cada uno de ellos abarca un rango de 10 unidades. El primero de ellos tiene como límite inferior el umbral de recepción, proveniente del servicio elegido.

Figura 3-17. Parámetros de interferencia Multitransmisor.



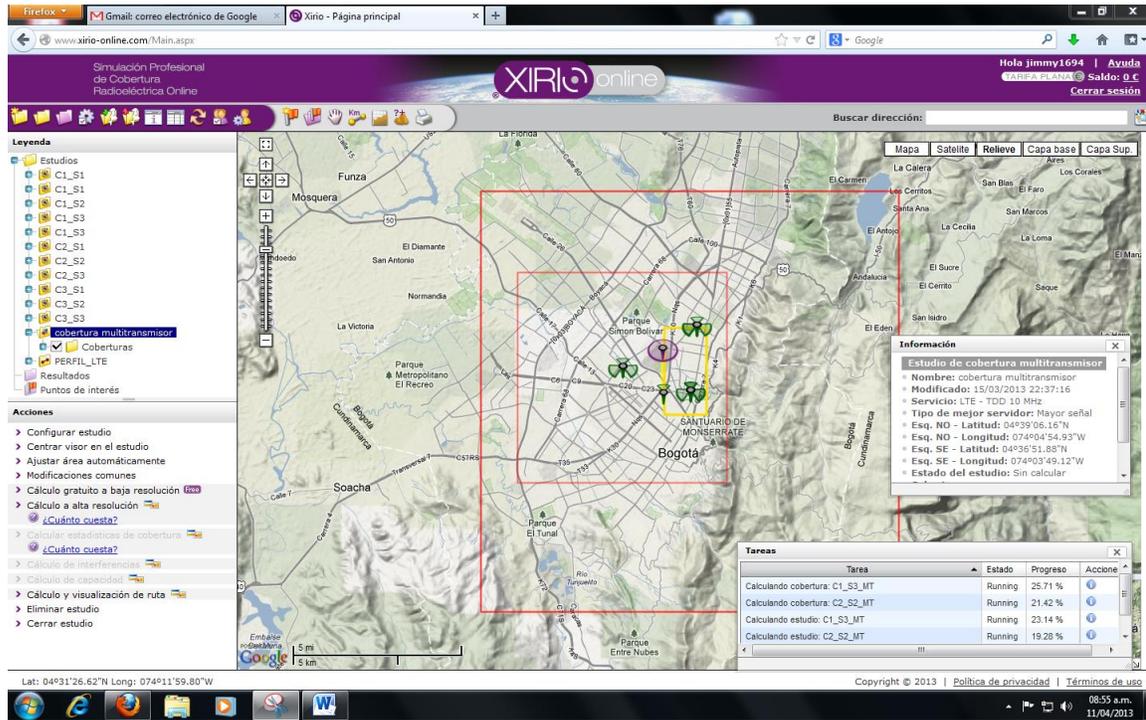
Para el cálculo del estudio multitransmisor se necesita recalcular los nodos en los cuales se realizara el estudio de cobertura.

Figura 3-18. Parámetros de cálculo de estudio Multitransmisor.



El escenario del desarrollo de las zonas en la cuales se realizará el estudio multitransmisor se enmarca en la zona de color azul.

Figura 3-19. Area de cálculo de estudio Multitransmisor.



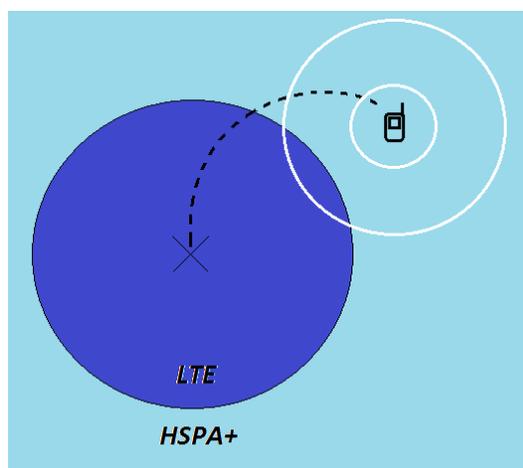
Las coordenadas GPS de longitud y latitud muestran para verificar si corresponden a las estaciones que se determinó para la simulación del escenario multitransmisor.

4. Comparativa de tecnologías sobre operadores de servicios de telefonía móvil 3G y redes LTE-A 4G

Los operadores móviles en Colombia ofrecen planes que permiten navegar desde dispositivos móviles a una velocidad teórica de 4 Mbps, tres veces más rápido que la tecnología 3.5G ofrecida actualmente por los operadores móviles de la región de alrededor 1.3 Mbps. Algunas empresas del mercado están ya implementando este tipo de servicios de 4G como UNE [51]. En estados unidos el término 4G se populariza entre las personas del común que necesitan el acceso a internet desde dispositivos móviles. Desde el año pasado operadores celulares y fabricantes de teléfonos han comenzado a promover la tecnología 4G LTE, con la que es posible navegar a través de dispositivos móviles, tablets y portátiles (Utilizando un modem) con una velocidad 10 veces superior que las tradicionales redes 3G [54].

En el caso de Colombia, Tigo, Claro y Movistar ofrecen también el servicio llamado 4G que si bien brinda mayor rapidez que 3G para acceder a la red no es el mismo que se comercializa en E.U, aun cuando tiene el mismo nombre. En la actualidad una sola compañía en Colombia esta implementado esta tecnología UNE, quien está implementando desde el año pasado una red similar a la que tienen los operadores estadounidenses. Para la empresa en superar alrededor de los 7.000 usuarios en el año 2012, ofreciendo una experiencia de mayores velocidades de navegación desde un dispositivo móvil [52]. 4G es un concepto definido por la Unión Internacional de Telecomunicaciones, organismo encargado de regular los temas de telecomunicaciones en el mundo para las recientes generaciones de redes móviles para servicios de banda ancha. HSPA+ (La utilizada por los operadores móviles en Colombia) siendo una de las tecnologías que la UIT ha ofrecido como 4G además de LTE y WiMAX móvil 802.16m [54].

Figura 4-1. Red convergente LTE a HSPA+.

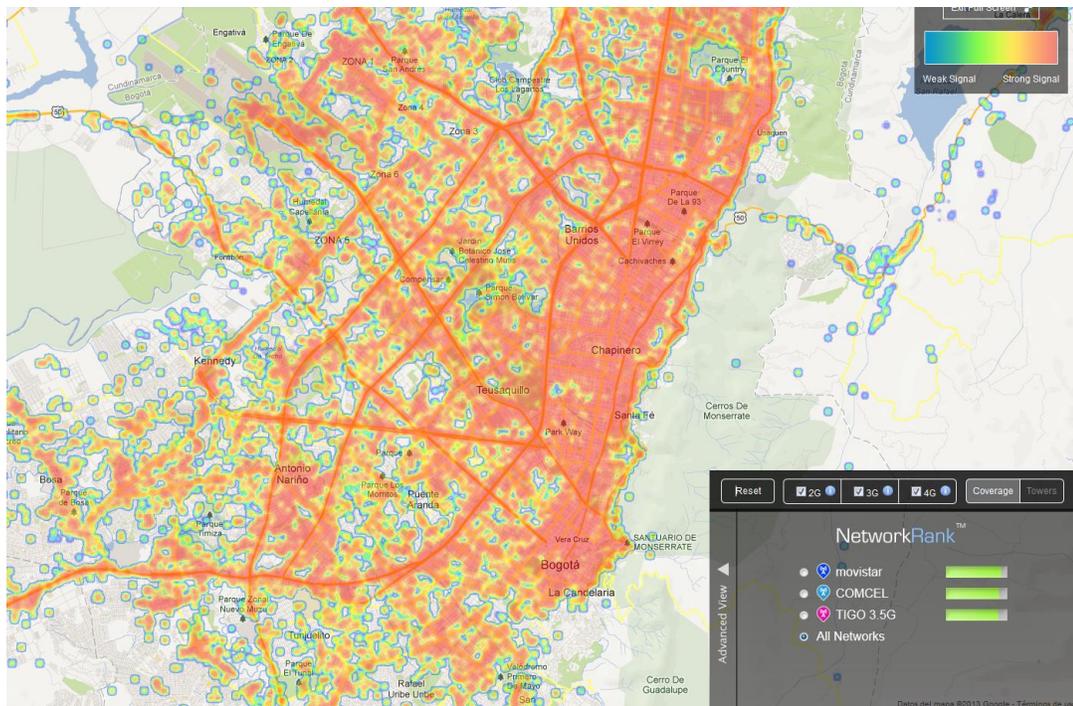


En estados unidos la tecnología se denomina 4G LTE (Long Term Evolution), la cual, para ofrecer el servicio, exige la instalación de una nueva red siendo esa la que tiene en proceso de implantación UNE. HSPA+ es una evolución de las redes 3.5G con las que cuentan los operadores Colombianos en

la actualidad. Los operadores ofrecen una velocidad teórica de descarga (*download*) de 4Mbps aunque no es una cifra en la que los operadores se comprometan por diferentes factores como el terreno, demanda de usuarios etc. [53]. Para disfrutar de esta tecnología 4G LTE es posible utilizarla desde dispositivos móviles que soporten la tecnología HSPA+; Los operadores actualmente ofrecen una gama de dispositivos móviles que cuentan con estas características como el Samsung Galaxy SIII e Iphone 5 como alternativas a este sentido para las laptop se puede acceder por medio de un modem USB que soporte tecnología 4G LTE [54].

Los operadores no han hecho diferencia en costos entre el valor de un plan de datos con la tecnología 3G y la HSPA+. Lo que si advierten es que para disfrutar se debe adquirir el equipo correspondiente que soporte la tecnología. En Tigo hay planes desde 27.900 pesos por 500Mb hasta 62.000 pesos por 5Gb. Claro ofrece 500Mb por 24.900 pesos hasta 59.900 pesos por 5Gb y 99.990 pesos por 10Gb. Movistar tiene planes desde 23.900 por 500Mb hasta 67.900 por 5Gb y 99.900 por 10Gb. UFF ofrece planes cerrados de 2Gb por 25.000 pesos hasta 5Gb por 45.000 pesos [54]. Teniendo presente otra serie de factores que entran en juego como la pelea entre las mismas sobre la posición de dominio de Claro, la licitación de 4G para su implantación sobre el terreno Colombiano ya asignación de bandas de frecuencia y la ley de antimonopolio medidas que le competen a la Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC) de las cuales las bandas de televisión análoga que dejaran de operar serán el nicho para posteriores legislaciones a la par de investigaciones correspondientes a redes NGN [54].

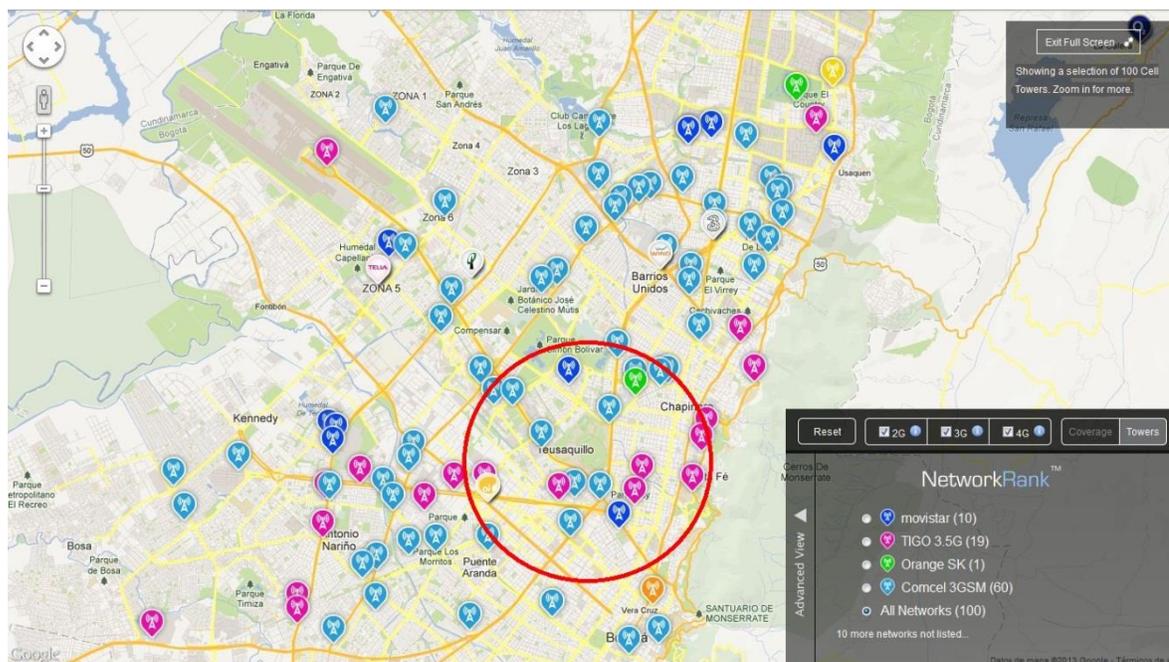
Figura 4-2. Cobertura 2G y 3G operadores de telefonía en Teusaquillo Bogotá D.C.



La cobertura de servicio redes 2G y 3G de los operadores actualmente en el área definida para la simulación en este documento se representan en la siguiente imagen bajo una gama de color naranja la más alta densidad de señal radioeléctrica la cual muestra el área de cobertura en la localidad de

Teusaquillo. A la par se muestra la ubicación de la cantidad de antenas que el operador tiene instaladas en el sector necesarias para transmitir el servicio ofrecido [54].

Figura 4-3. Estaciones Tx, Rx 2G y 3G operadores de telefonía en Teusaquillo Bogotá D.C.



El servicio de 4G no está presente en la cartografía de Colombia ya que desde el segundo semestre del 2012 se empezó a implantar esta tecnología de manera gradual solo para datos por el operador UNE en el territorio colombiano [55].

Un proceso en el cual es posible comparar transferencia de datos es usando un modem USB del proveedor UNE EPM Telecomunicaciones S.A. E.S.P. las características del dispositivo se amplían en el ANEXO A de este documento, la prueba de descarga se realizó con un modem USB ZTE multimodo, que opera en redes LTE FDD/UMTS/EDGE/GSM. Ejecutando en test en una computadora TOSHIBA con sistema operativo Windows 8 PRO. Con una interfaz USB de conexión a la computadora combina funcionalidades móviles con el internet perfectamente a velocidades de transferencia altas a las ofrecidas por los operadores 3G o 3.5G dependiendo del plan adquirido con el proveedor. Las capturas de prueba se realizaron con la herramienta online www.speedtest.net en dos franjas horarias del día, una a las 6:00AM de la mañana y la otra a las 1:40 PM de la tarde, en los alrededores de la localidad de Teusaquillo más específicamente en el campus de la Universidad Nacional De Colombia Bogotá. Alcanzando unas tasas de DL 19.38 Mbps y de UL 1.85 Mbps conectándose al servidor EDATEL ISP de La ciudad de Medellín en la mañana y en la tarde con una tasa de DL 13.21 Mbps y de UL 1.85 Mbps conectándose al servidor Empresas Municipales de Cali EMCALI E.S.P.

Figura 4-4. Test LTE-A UNE. EMP Telecomunicaciones S.A E.S.P. Hora 6:00 AM.



Figura 4-5. Test LTE-A UNE. EMP Telecomunicaciones S.A E.S.P. Hora 1:45 PM.



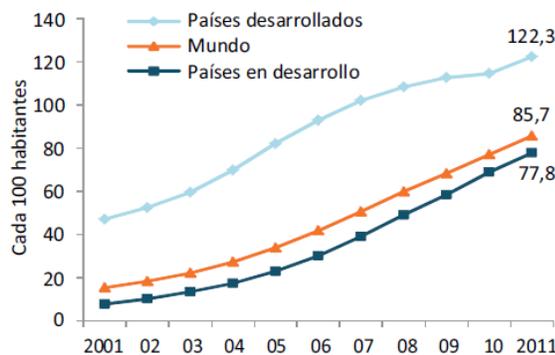
La tecnología LTE-A en nuestro país está en sus inicios por lo cual los costos y cobertura se irán mejorando paulatinamente con la masificación y la migración hacia estas tecnologías emergentes de nueva generación como lo es LTE-A.

5. Impacto ambiental generado bajo tecnologías emergentes NGN LTE-A para operadores móviles

El desarrollo de la telefonía móvil ha experimentado un crecimiento casi exponencial que ha supuesto la proliferación caótica de este tipo de redes de telecomunicaciones y un aumento significativo de la contaminación electromagnética y la percepción social del riesgo asociado a estas infraestructuras. La legislación nacional Colombiana no ha resuelto de fondo el impacto social y ambiental de las redes de telefonía móvil. La estructura normativa y legislativa que nos rige en Colombia respecto a las redes de telefonía móvil no está tan desarrollada y preparada como lo ha sido su implantación por los diferentes operadores que cuenta el país. Se ha visto el establecimiento de la trama de telecomunicaciones para sitios muy alejados de las ciudades o mejor llamados rurales con toda una serie de infraestructuras de antenas, estaciones base GSM, UMTS, dipolos, receptores de tv y radio, picocelulas, microantenas, radioenlaces etc. Que se van a multiplicar más con el desarrollo de nuevas tecnologías como LTE [56].

El porcentaje de Entre 2010 y 2011, los abonados al servicio móvil celular registraron un crecimiento continuo de dos dígitos en los mercados de los países en desarrollo, pero se observó una desaceleración general en comparación con años anteriores. El número de abonados al servicio móvil celular aumentó en más de 600 millones, casi todos ellos en los países desarrollados, a un total de alrededor de 6 mil millones, o sea, 86 de cada 100 habitantes, a nivel mundial como lo muestra el Gráfico 6-1. China por sí sola alberga mil millones de abonados y se espera que la India llegue a mil millones en 2012. La tasa de penetración móvil celular aumentó en un 11% en todo el mundo, en comparación con 13% el año anterior. En general, el aumento del número de proveedores de servicios ha dado lugar a una competencia a veces feroz en el sector y ha hecho bajar los precios al consumidor de manera significativa, lo cual ha sido un factor clave en la propagación de los servicios móviles celulares [57].

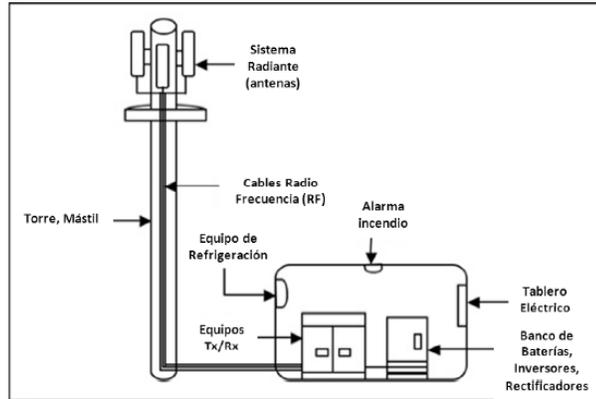
Figura 5-1. Abonados servicio móvil celular en el mundo y por nivel de desarrollo 2001-2011 ITU³⁴.



LTE tiene una característica muy importante la cual es el hecho de interactuar con una red RAN y no ser de por sí una RAN permite a los operadores de telefonía móvil independiente de sus condiciones de servicio (Virtual o no Virtual) permite la escalabilidad en las tecnologías existentes o mejor llamado su

correspondiente migración del actual estándar UMTS de manera escalada sin afectar los servicios o la interrupción de los mismos por el cambio de plataforma tecnológica. Tomando en cuenta como punto relevante en las redes LTE-A lo descrito anteriormente desde su implementación tecnológica, permitiendo mayor cobertura a partir de frecuencias y tasas de transferencia mayores, permitiendo mayor independencia de la red LTE-A a su red de acceso RAN [58].

Figura 5-2. Diseño conceptual de una estación base BTS.



Eso hace que la cantidad de energía consumida por la red de acceso sea menor a lo frecuentemente usado, una RAN representa alrededor de un 30% de la energía utilizada para un servicio de telefonía móvil actual, otro componente que consume grandes cantidades de energía son las estaciones base de telefonía móvil (*Base Transceiver Station BTS*) las cuales representan el centro de toda la actividad de comunicación con vista hacia la prestación del servicio (Potencia para cubrir una celda), el esfuerzo adicional que se está implementando en este tipo de redes RAN se presenta técnicas de software para mitigar en parte toda la carga a la red como tal y otorgarle el esfuerzo al software. Siendo así todas las empresas deben reducir las emisiones de CO₂ y un uso innovador de la tecnología móvil como la tecnología LTE-A puede crear una economía con bajas emisiones. La necesidad de reducir las emisiones de gases efecto invernadero es una notable oportunidad de negocio para este tipo de empresas los productos y servicios inteligentes permitirán ahorrar el dinero a los clientes y ayudaran a reducir las emisiones, por lo que su atractivo se irá incrementando a medida que el coste de CO₂ aumente [59].

Figura 5-3. Conversión entre factores de energía y CO₂

Generación CO₂	Kilogramos CO₂
1 kWh de electricidad	0,5453
1 kWh de gas natural	0,185
1 m3 de electricidad	1,9

Las oportunidades en la disminución de emisiones de gas en servicios móviles que se proyectan hacia el 2020 se basan en diseño de dispositivos móviles (UE), desarrollo de sistemas Software para soportar dispositivos electrónicos de carga de trabajo alta (Firewalls) que corresponden a 113 millones de

toneladas de CO₂ que equivalen a la reducción del 18% de las emisiones del Reino Unido en el 2008. Esto significa un ahorro de 43.000 millones de euros solo en gasto energético i requerirá 1.000 millones de conexiones móviles el 87% de ellas de maquina a máquina (M2M), para conectar un dispositivo a otro de manera inalámbrica. Lo cual resulta a otros gobiernos muy útiles datos como los anteriores y a entes implicados en la normalización de reglas para proteger el medio ambiente sin dejar de lado el desarrollo tecnológico como tecnologías emergentes LTE-A [60].

6. Conclusiones y Recomendaciones

A continuación se describen las correspondientes conclusiones sobre la simulación realizada de la tecnología LTE-A y algunas recomendaciones las cuales pueden ser pie para investigaciones futuras en la materia.

6.1. Conclusiones

- La implementación de tecnologías NGN como LTE-A cumple las especificaciones de la recomendación ITU-R M. 1457 tanto en aspectos técnicos como de cobertura y servicio para redes de alta velocidad la cual se adoptó como la tecnología a usar bajo denominación de tecnología 4G.
- La característica más relevante de la Tecnología LTE-A entre muchas otras es el reúso de las frecuencias, permitiendo optimizar de la mejor manera el espectro radioeléctrico en el cual opere, el cual permite ofrecer las mejores condiciones de transmisión, eficiencia y confiabilidad en los servicios.
- En una red móvil de cuarta generación como LTE-A se centra en la conmutación de paquetes y no en la conmutación de circuitos como los operadores actuales o 3G, esto permite mayor seguridad en la red que transporta los datos e interoperabilidad con otras redes IP permitiendo lo que se llama convergencia de tecnologías.
- La licitación de espectro para los servicios de internet de alta velocidad 4G en Colombia permitirá que los operadores de telefonía móvil incursionen en migrar sus plataformas a servicios de mayor calidad y cobertura no solo para datos sino también para la voz permitiendo de manera proporcional un ajuste de precios tarifarios o cargos de acceso a la red móvil como lo estipula la ley 1341 de 2009, que permita en un futuro implicar a la voz como parte de los datos y así no tener ningún costo.

6.2. Recomendaciones y trabajos futuros

- El proceso de migración hacia tecnologías NGN como LTE-A ara que se necesite actualizar los terminales móviles o llamados terminales UE, el cual generara muchos equipos móviles fuera de servicio, sería necesario la intervención de un ente regulador que permita generar estrategias para mitigar la contaminación con estos equipos fuera de uso y fomentar legislaciones para el tratamiento de este tipo de desechos tecnológicos en Colombia.
- Definir reglas claras a nivel legislativo y tarifario ya que es necesario medidas donde se pongan límites a los topes tarifarios, condiciones plurales para los operadores de telefonía móvil con cara a la licitación de espectro para los servicios radioeléctricos 4G en Colombia, no solo a la telefonía móvil, sino también a todos los servicios del sector, Buscando el mejor beneficio de los usuarios.
- Con base en los estudios del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (*MINTIC*) ha realizado para que Colombia tenga unos niveles cada vez más altos en la masificación de lo que son las TIC's adoptando los modelos de desarrollo por el Banco Mundial con base al ecosistema digital, se deben de establecer estándares de oferta y demanda cada vez más centrados en el buen servicio al cliente y así reducir la llamada brecha digital a través de la misma adopción de tecnologías como LTE-A, apropiarlas desde la infraestructura hasta los servicios y aplicaciones.
- La escalabilidad de la tecnología LTE-A bajo las redes existentes hace que progresivamente se esté adaptando la infraestructura a las necesidades actuales, por tal razón es necesario trabajar en la definición una normatividad de implementación en coherente y escalable desde todos los puntos de vista ya sea técnico, ambiental, legislativo y de servicios.

Anexo A: Especificaciones Modem ZTE USB

A continuación se ilustra las especificaciones del modem ZTE USB con el cual se realizó una de las pruebas de transferencia de datos.

Introducción
 El módem USB ZTE es un módem USB multi modo, que operando en redes LTE FDD/UMTS /EDGE /GSM. Con una interfaz USB de conexión a su computador, este integra las funcionalidades de un módem y combina la comunicación móvil con el internet perfectamente. El módem soporta datos permitiéndole comunicarse a cualquier lugar y/o cualquier hora.

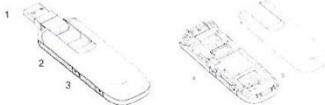
Especificaciones
 La tabla a continuación muestra las especificaciones de su dispositivo.

Tipo de interfaz	USB 2.0 de alta velocidad
Sistemas soportados	Soporta la mayoría de tipos computadores portátiles y de escritorio.
Sistemas operativos soportados	Windows XP, Vista, Windows 7 MAC 10.5, 10.6, 10.7,
Funciones	Servicios de datos, administración de aplicaciones, etc.
Estándares de red	LTE FDD/UMTS/EDGE/GSM

Velocidad de transmisión (Max)	LTE-FDD: 100Mbps DL, 50Mbps UL HSUPA: 5.76Mbps UL, HSDPA: 42Mb/s DL WCDMA PS: UL 384kbps/DL 384kbps
Temperatura	Almacenamiento: -40°C ~ +80°C Operación: -10°C ~ +45°C
Dimensiones	87.3mm×29.5mm×14mm
Capacidad microSD	Soporta tarjeta microSD de hasta 32GB

Notas:
 microSD  es una marca registrada de la Asociación SD Card.

Conociendo su dispositivo
 La imagen a continuación muestra la apariencia del MF821. Esta es solo para referencia. El producto real puede diferir



1. Conector USB
2. Tapa frontal
3. Indicador
4. Ranura para tarjeta microSD
5. Ranura para tarjeta (U)SIM

Instalación del Hardware
 1. Coloque el dedo en el agarre táctil inferior y levante la tapa delantera del módem para soltarla y removerla.

Notas:
 Levante la tapa delantera cuidadosamente para evitar daños a la misma.





4G Lte

PERÍODO FACTURADO:
DEL 01 ABRIL AL 30 ABRIL DIAS DE CONSUMO 30 DIAS
PLAN: 1.2 GB Individual Cerrado Masi

CARGO FIJO	\$	34,396.55
IVA 16% 4G LTE	\$	5,503.45
INTERÉS MORA	\$	235.44
INTERÉS DE MORA DEL IVA	\$	37.67
AJUSTE	\$	-0.11

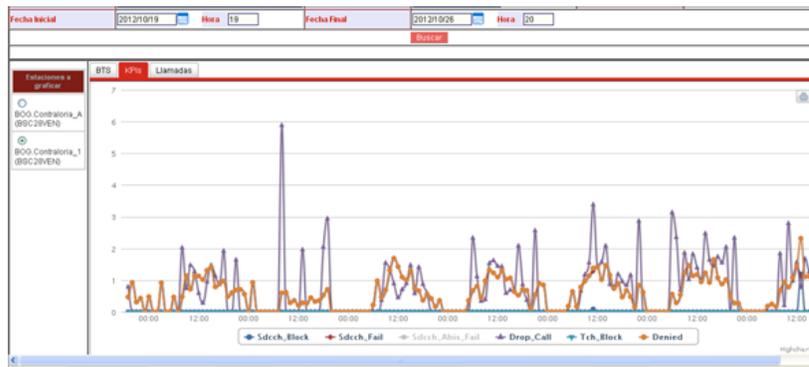
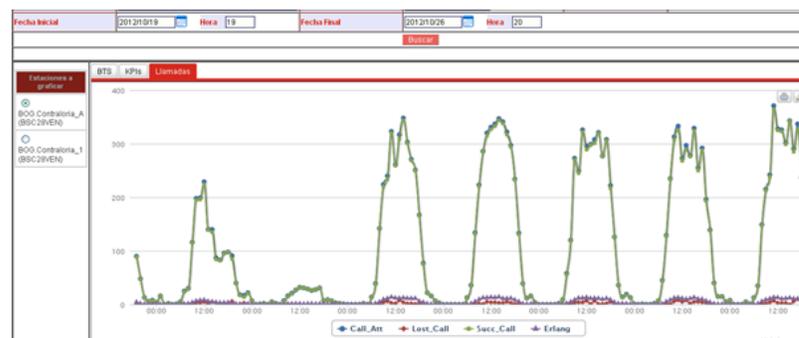
ZTE MF 821 USB MODEM

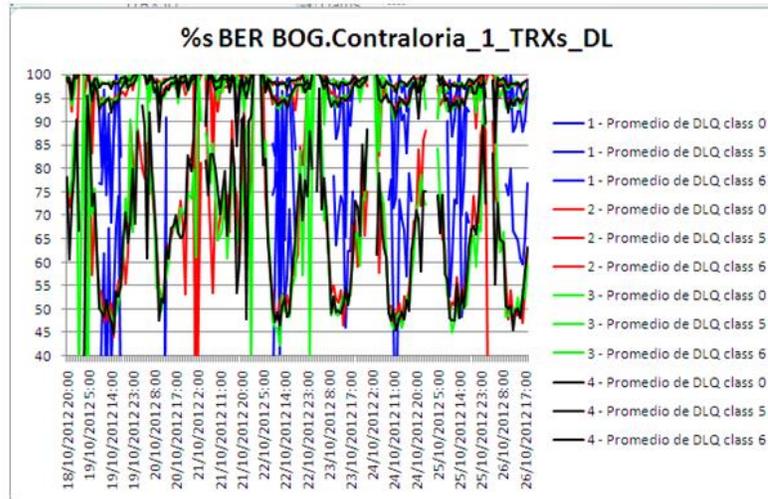
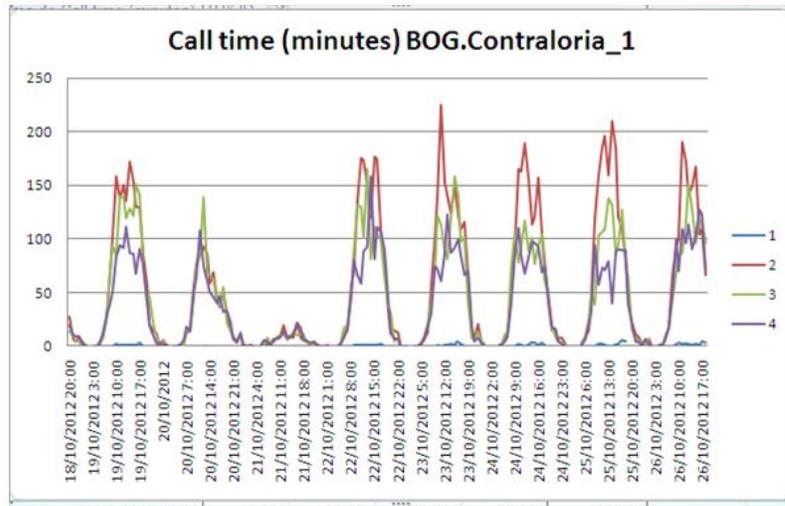
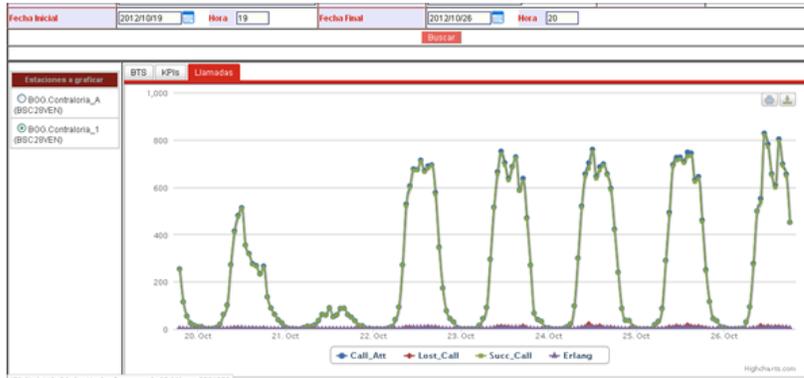


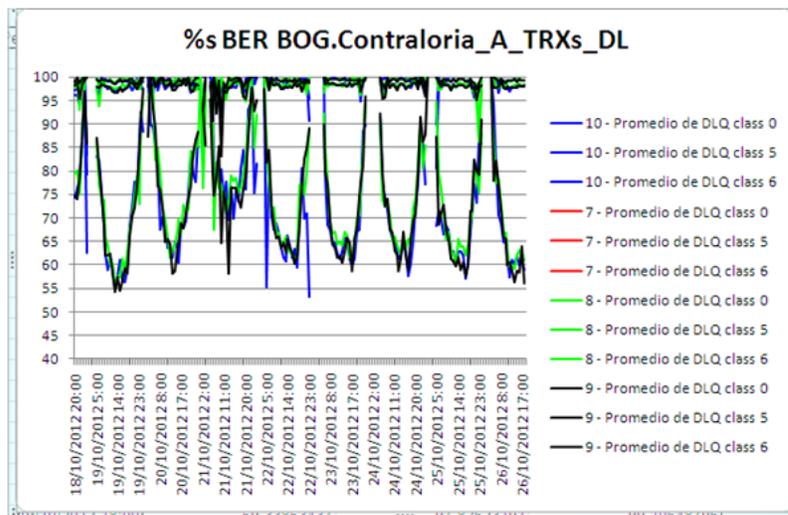
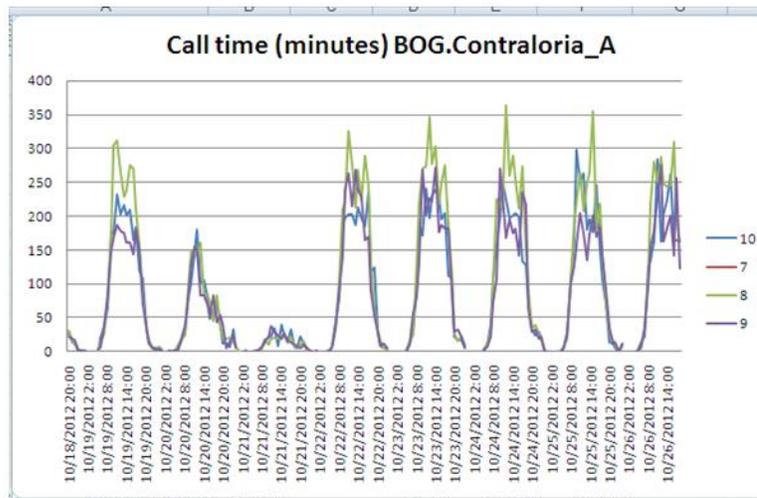
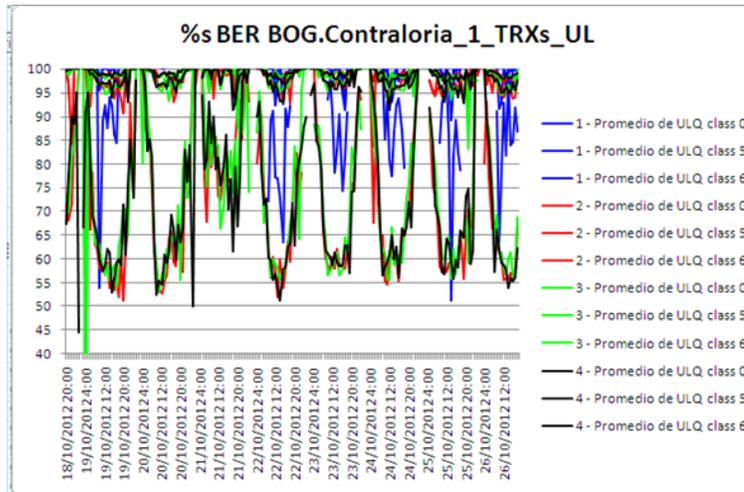
Anexo B: Estadísticas Estación Base BOG Contraloría GSM

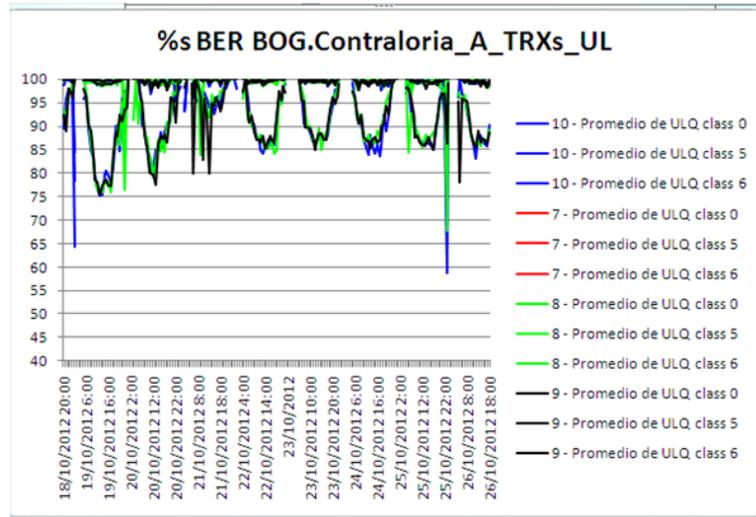
SITE_NAME	BSC	BCFs	ESTADO
BOG.CONTRALORIA	BSC28VEN	167	No se registran TRX BL OK!

Todos los sectores presentan estadísticas normales. Los TRX presentan %s de BER y asignación de llamadas acordes con el resto de TRXs del sector. No se observan alarmas con alta intermitencia y/o recurrencia que impliquen afectación en el desempeño. El trabajo se encuentra aprobado por RF. Estadísticas Calidad OK.









REGISTRÓ FOTOGRAFICO DE NODO BOGOTA CONTRALORIA

A continuación se ilustra unas imágenes de una estación base y su antena GSM del operador CLARO según se establece en los recuadros de la columna izquierda en algunas imágenes se detallan datos relevantes de la misma. Resolución: mínima 800x600 pixeles, máxima: 1024x768 pixeles. Ubicada en la Carrera 10 Con Calle 17 Bogotá D.C sobre el edificio al frente de la contraloría Bogotá D.C cubriendo al sector donde apunta la antena.





<p>ANTES Sector: [1-A]</p>	
<p><u>Tilt</u> Mecánico</p>	
<p>Valor: [30°]</p>	
<p>Revisado según <u>Datafill?</u></p>	
<p>SI: []</p>	
<p>NO: [X]</p>	



Orientación de la antena GSM CLARO.





PANORAMICA
DE LA
ESTACION

*Debe
observarse la
torre, poste,
etc. y las
antenas.*



PANORAMICA
DE LA
ESTACION





Bibliografía

- [1] Ramón Agusti, Francisco Bernardo, Fernando Casadevall, Ramon Ferrús, Jordi Pérez-Romero, Oriol Sallent, "LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles" Fundación Vodafone España, vol. 2010, pp. 55–109.
- [2] *TECHNICAL WHITE PAPER: Long Term Evolution (LTE): A Technical Overview.*
- [3] *3G EVOLUTION HSPA and LTE for mobile broadband* second Edition 2008. Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Sköld and Per Beming. Published by Elsevier Ltd. pp. 241-244.
- [4] *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband* Erik Dahlman, Stefan Parkvall, and Johan Sköld Academic Press is an imprint of Elsevier The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1GB, UK 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA First published 2011. pp. 40-43.
- [5] *LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice* Stefania Sesia, Issam Toufik and Matthew Baker © 2009 John Wiley & Sons, Ltd pp. 345-350.
- [6] Motorola, 'R1-050397: EUTRA Uplink Numerology and Frame Structure', www.3gpp.org, 3GPP TSG RAN WG1, meeting 41, Athens, Greece, May 2005.
- [7] Motorola, 'R1-050584: EUTRA Uplink Numerology and Design', www.3gpp.org, 3GPP TSG RAN WG1, meeting 41bis, Sophia Antipolis, France, June 2005.
- [8] U. Sorger, I. De Broeck and M. Schnell, 'Interleaved FDMA – A New Spread-Spectrum Multiple-Access Scheme', in *Proc. IEEE International Conference on Communications*, pp. 1013–1017, 1998.
- [9] 3GPP TS 31.102, "Characteristics of the Universal Subscriber Identity Module (USIM) application".
- [10] 3GPP TS 27.007, "AT command set for User Equipment (UE)".
- [11] 3GPP TS 36.306, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); "UE Radio Access Capabilities".
- [12] 3GPP TS 23.203, "Policy and charging control architecture".
- [13] "Quality of Service in IP Networks", Grenville Armitage, Publisher: New Riders, First Edition, April 07, 2000, ISBN: 1-57870-189-9.
- [14] 3GPP TS 23.107, "Quality of Service (QoS) concept and architecture".
- [15] 3GPP TS 23.401, "General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access".
- [16] 3GPP TS 33.210, "3G Security; Network Domain Security; IP network layer security".
- [17] 3GPP TR 25.913, "Requirements for evolved UTRA and evolved UTRAN".
- [18] 3GPP TS 33.401, "3GPP System Architecture Evolution (SAE), Security architecture".
- [19] 3GPP TS 33.210, "3G Security; Network Domain Security; IP network layer security".
- [20] IETF RFC 4301, "Security Architecture for the Internet Protocol".
- [21] IETF RFC 4303, "IP Encapsulating Security Payload (ESP)".
- [22] IETF RFC 4306, "Internet Key Exchange Protocol Version 2".
- [23] F. Khan, *LTE for 4G Mobile Broadband*, Cambridge University Press, 2009.
- [24] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld, P. Beming, *3G Evolution. HSPA and LTE for Mobile Broadband*, Academic Press, Elsevier, 1a edición, 2007.
- [25] H. Sari, G. Karam, I. Jeanclaude, "Frequency-Domain Equalization of Mobile Radio and Terrestrial Broadcast Channels", IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), San Francisco, USA, 1994.
- [26] D. Falconer, S.L. Ariyavisitakul, A. Benyamin-Seeyar, B. Eidson "Frequency Domain Equalization for Single-Carrier Broadband Wireless Systems", IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 4, April, 2002, pp.58-66.

- [27] A. Pokhariyal, T.E. Kolding, P.E. Mogensen “Performance of Downlink Frequency Domain Packet Scheduling for the UTRAN Long Term Evolution”, 17th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Helsinki, septiembre, 2006.
- [28] H.G.Myung, J. Lim, D.J. Goodman, “Single Carrier FDMA for Uplink Wireless Transmission”, IEEE Vehicular Technology Magazine, septiembre, 2006, pp. 30-38.
- [29] H.G.Myung, J. Lim, D.J. Goodman, “Single Carrier FDMA for Uplink Wireless Transmission”, IEEE Vehicular Technology Magazine, septiembre, 2006, pp. 30-38.
- [30] H.G.Myung, J. Lim, D.J. Goodman, “Single Carrier FDMA for Uplink Wireless Transmission”, IEEE Vehicular Technology Magazine, septiembre, 2006, pp. 30-38.
- [31] O. Mauritz, B. M. Popovic, “Optimum Family of Spectrum-Shaping Functions for PAPR Reduction of DFT-Spread OFDM Signals”, IEEE 64th Vehicular Technology Conference, VTC-2006 Fall, Montreal, Canada, Sept. 2006.
- [32] F. Khan, *LTE for 4G Mobile Broadband*, Cambridge University Press, 2009.
- [33] W.C.Y. Lee, *Mobile Communications Engineering*, Ed, McGraw Hill, 1982.
- [34] T.Lo, “Maximal Ratio Transmission”, IEEE Transactions On Communications, October 1999.
- [35] W.C.Y. Lee, “Mobile Communications Design Fundamentals” Ed, Wiley Interscience, 1993.
- [36] Tarokh, V. Seshadri, N. Calderbank, A.R. “Space Time codes for High Data Rate Wireless Communications”: Performance Criteria and Code Construction”, IEEE Trans. On Information Theory, 1998.
- [37] S.Alamouti, “A Simple Transmit Diversity technique for wireless communication, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998.
- [38] G. Foschini, M. Gans, “On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas”, IEEE Wireless Personal Communications, March 1998.
- [39] I. Talatar “Capacity of Multiple Antenna Gaussian Channels” European Trans. Tel., Nov/Dec 1999.
- [40] Robert W. Heath, Jr. and Arogyaswami J. Paulraj, “Switching Between Diversity and Multiplexing in MIMO Systems” IEEE Transactions on Communications, June 2005.
- [41] C. B. Peel, B. M. Hochwald, and A. L. Swindlehurst, “A Vector-Perturbation Technique for Near-Capacity Multi-Antenna Multi-User Communication – Part I: Channel Inversion and Regularization” IEEE Transactions on Communications, Vol. 53, No.1, January, 2005, pp. 195-202.
- [42] D. Gesbert, M. Kountouris, R. W. Heath, Jr., C.-B. Chae, and T. Salzer, “Shifting de MIMO Paradigm: From Single User to Multiuser Communications”, IEEE Signal Processing Magazine, vol. 24, no. 5, pp. 36-46, Oct., 2007.
- [43] 3GPP TS 36.211 V8.1.0 “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation”, noviembre, 2007.
- [44] 3GPP TS 25.211: "Physical channels and mapping of transport channels onto physicalchannels (FDD)".
- [45] ETSI EN 301 213-3 (2002-02), Point-to-Multipoint digital radio systems in frequency bands in the range 24,5 GHz to 29,5 GHz using different access methods; Part 3: Time Division Multiple Access (TDMA) methods.
- [46] Garrison, G. J., “Adjacent Frequency Block TDD/FDD Coexistence Scenarios for BWA”, Draft 03, 2000.
- [47] Garrison, G. J., “Uncorrelated Rain Fading and its Impact on Frequency Re-Use and Antenna RPE Specifications”, Draft 02, 2000.
- [48] IEEE Std 802.16-2001, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems.10, 11.

- [49] IEEE Std 802.16c-2002, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems— Amendment 1: Detailed System Profiles for 10–66 GHz.
- [50] Beyer, D., “Fundamental Characteristics and Benefits Of Wireless Routing (‘Mesh’) Networks,” *8th Annual WCA Technical Symposium*, Jan. 15, 2002.
- [51] Global mobile Suppliers Association, GSA forecasts 134 commercial LTE networks by end 2012 Evolution to LTE report (May 8, 2012), www.gsacom.com.
- [52] LTE Forum 2012 – June 5-6, 2012 - Istanbul (GSA is the lead Endorsing Association and conference chair) Testimonials from previous LTE Forum events: www.lteforum2012.com/istanbul/news.php
- [53] 2012 sees LTE continuing to gain momentum as the fastest growing mobile technology of all—time and the move by some operators to re-farm 1800MHz spectrum represents the beginning of another key trend. ALAn HAddEn, cHAirMAn, GSA.
- [54] <http://www.claro.com.co>, <http://www.movistar.co>, <http://www.tigo.com.co>, <https://www.uffmovil.com>.
- [55] <http://opensignal.com>
- [56] EUROPEAN UNION (UE): Implementation Report on the Concucil Recommendation limiting the public exposure to electromagnetic fields (0 Hz – 300 GHz) 2000.
- [57] EUROPEAN UNION (UE): Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general of the general public to electromagnetic fields (0 Hz – 300 GHz), (1999/519/CE), Official Journal of the European Communities. 30.7.1999.
- [58] “Estrategia de migración de las redes de voz alámbricas, inalámbricas y móviles a la arquitectura de redes de nueva generación” Tesis; Eduardo García Sainos, 2003.
- [59] Arquitectura de red de acceso móvil de cuarta generación: Mobile-IP RAN, Alberto Montilla Bravo, 2009.
- [60] Algoritmos de control de consumo energético para estaciones base de telefonía, Pablo Salvador Ulloa Gaete, Enero, 2012.