Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil Electrónica

LTE, EVOLUCIÓN A LARGO PLAZO PARA EL ACCESO INALÁMBRICO DE BANDA ANCHA MÓVIL

Tesis para optar al título de:
Ingeniero Electrónico

Profesor Patrocinante:
Sr. Pedro Rey Clericus.
Ingeniero Electrónico
Licenciado en Ciencias de la Ingeniería
Diplomado en Ciencias de la Ingeniería

KATHERINE ELIZABETH SOTO SOTO

VALDIVIA - CHILE

2009

COMISIÓN DE TITULACIÓN

_____

Sr. Pedro Rey Clericus

Profesor Patrocinante

_____

Sr. Franklin Castro Rojas

Profesor Informante

_____

Sr. Raúl Urra Ríos

Profesor Informante

Fecha del Examen de Titulación: _____

A mi querida madre,

Rebeca Soto,

por el apoyo brindado en esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a Dios, por haberme permitido concluir esta etapa muy importante de mi vida, guiándome en el camino correcto para alcanzar mis objetivos y sobre todo por darme la bendición de compartirla con mis seres queridos.

A mi madre, pilar fundamental para alcanzar esta meta, que gracias a su esfuerzo permitió mi formación profesional.

A mi pololo, Rodolfo, por su amor, compañía y apoyo incondicional en esta última etapa de mi carrera de pregrado. Además por su gran ayuda y colaboración brindada en momentos que lo necesite durante el desarrollo de esta tesis. Y por todos sus consejos que me hacen ser una mejor persona.

A mi Bastían, por darme esas tardes de alegría al llegar a la casa, recibiéndome siempre con una sonrisa y un abrazo.

A mi padre, Víctor, por su apoyo y preocupación durante mi vida universitaria, a pesar de la distancia. Inculcándome que no hay mejor herencia que la educación.

A mis compañeros de la promoción *2003-2008*, con los que compartí esta hermosa carrera universitaria. A mis profesores de la carrera, por haberme transmitido sus conocimientos y experiencias. Y a todos los funcionarios de la Universidad que me hicieron mas grata mi estadía en ella.

Muchas gracias a todos.

ÍNDICE

PÁG.

CAPÍTULO I: EVOLUCIÓN 3G. 1

1.1 Antecedentes ... 1

1.1.1 Antes de 3G ... 2

1.1.2 Primeras Recomendaciones de 3G ... 4

1.1.3 La Investigación sobre 3G ... 5

1.2 Estandarización ... 6

1.2.1 Proceso de Estandarización ... 6

1.2.2 3GPP ... 8

1.2.3 Actividades de la UIT con respecto a las IMT-2000 ... 13

1.3 Espectro de 3G ... 16

1.4 Evolución del Sistema ... 18

1.5 Arquitectura de la Evolución del Sistema ... 19

CAPÍTULO II: TECNOLOGÍAS INALÀMBRICAS Y LTE. 22

2.1 Antecedentes ... 22

2.2 Tecnologías Inalámbricas ... 23

2.2.1 Tecnologías 3GPP ... 23

2.2.2 Tecnologías Competidoras ... 28

2.3 Comparación de Tecnologías Inalámbricas ... 33

2.3.1 Latencia ... 34

2.3.2 Eficiencia Espectral ... 34

2.4 Costos y Volumen de mercado ... 38

CAPÍTULO III: TÉCNICAS DE ACCESO AL MEDIO. 40

3.1 Sistemas de Transmisión ... 40

3.1.1 OFDM ... 40

3.1.2 SC-FDMA ... 45

3.2 Programación del canal y adaptación de la velocidad de datos ... 47

3.2.1 Programación del enlace descendente ... 49

3.2.2 Programación del enlace ascendente 51
3.2.3 Interferencia Inter-Celda 52
3.3 Esquema de Retransmisiones Selectivas 53
3.4 Múltiples Antenas 55
3.5 Soporte Multicast y Broadcast 57
3.6 Flexibilidad del Espectro 58
3.6.1 Flexibilidad en el Sistema dúplex 58
3.6.2 Flexibilidad en la Frecuencia de banda de operación 60
3.6.2 Flexibilidad del Ancho de banda 61
3.7 Esquemas de Modulación 62

CAPÍTULO IV: ARQUITECTURA DE RED Y PROTOCOLOS. 64
4.1 Antecedentes 64
4.2 División de funciones entre RAN y CN 66
4.3 Arquitectura RAN 68
4.3.1 Red de Acceso Radio de WCDMA/HSPA 68
4.3.2 Red de Acceso Radio de LTE 72
4.4 Arquitectura CN 74
4.4.1 Núcleo de Red GSM utilizado por WCDMA/HSPA 74
4.4.1.1 MBMS, Multicast y Broadcast 76
4.4.1.2 Roaming 76
. 4.4.1.3 Control de Políticas y de Tarificación 77
4.4.2 El Núcleo de Red SAE: Evolved Packet Core 78
4.4.2.1 SAE Gateway 80
4.4.2.2 MME 81
4.4.2.3 S1 flex 82
4.4.2.4 Roaming 82
. 4.4.2.5 Control de Políticas y de Tarificación 83
4.3.3 WCDMA/HSPA conectado al Evolved Packet Core 84
4.5 Arquitectura de Protocolos de la Interfaz radio 85
4.5.1 RLC: Radio Link Control 86

4.5.2 MAC: Medio Access Control 87
4.5.2.1 Canales Lógicos y de Transporte 87
4.5.2.2 Programación del Downlink y Uplink 90
4.5.2.3 ARQ híbrido 91
4.5.3 PHY: Physical Layer 92
4.5.4 Estados LTE 93
4.5.5 Flujo de datos 94
4.5.6 Interfaz Radio 95
4.6 QoS, Calidad de Servicio 96

CAPÍTULO V: DESARROLLO GLOBAL. 98
5.1 Antecedentes 98
5.2 Velocidad de transmisión de datos 100
5.2.1 Velocidades Peak 100
5.2.2 Impacto de las condiciones RF: calidad de la señal y velocidad UE. 101
5.2.3 Intercambio throughput de celda entre muchos usuarios 102
5.2.4 Impacto de la cabecera de protocolo sobre el throughput de una aplicación final 103
5.2.5 Velocidades de Datos del usuario final 104
5.3 Latencia 105
5.3.1 Latencia del plano de control 105
5.3.2 Latencia del plano de usuario 106
5.3.3 Latencia de la interfaz aire 106
5.3.4 Latencia del plano de usuario de extremo a extremo 107
5.3.5 Pre-programación vs. Programación requerida para del recurso UL 108
5.4 Soporte QoS y VoIP 108
5.5 Handover entre varias celdas 109
5.6 Prueba de Interoperabilidad 110
5.6.1 IODT 111
5.6.2 IOT 111
5.7 Ensayos de atención al cliente 111
5.8 Desarrollo e implantación de LTE en el mundo 112

5.8.1 Despliegue de LTE en Chile 114
5.8.2 Regulación del espectro LTE en Chile 115
5.7 Servicios y Aplicaciones 116
5.8 Ventajas y Desventajas 118

CONCLUSIONES 120
ANEXOS 123
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 134

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁG.
Figura 1.1	Fases de estandarización y el proceso iterativo	7
Figura 1.2	Estructura del 3GPP	10
Figura 1.3	Releases del 3GPP	13
Figura 1.4	Interfaces Radio Terrestre IMT-2000	15
Figura 1.5	Espectro de frecuencia asignado	16
Figura 1.6	Banda FDD conocida como WCDMA y TDD como TD-CDMA	17
Figura 1.7	Frecuencias asignadas alrededor de 2,6 GHz	18
Figura 1.8	Sistemas de la Evolución	19
Figura 1.9	Disposición de las celdas	20
Figura 1.10	Arquitectura 3G	20
Figura 1.1	Estrategia de despliegue HSPA y LTE	21
Figura 2.1	Rendimientos peak para el enlace ascendente y descendente	26
Figura 2.2	Adopción Tecnológica en décadas	26
Figura 2.3	Evolución de los sistemas TDMA, CDMA y OFDMA	33
Figura 2.4	Latencia de las diferentes tecnologías 3GPP	34
Figura 2.5	Comparación de Eficiencia espectral Downlink	35
Figura 2.6	Comparación de Eficiencia espectral Uplink	36
Figura 2.7	Comparación de la capacidad de Voz	37
Figura 2.8	Abonados EV-DO, WCDMA/HSPA y WiMAX	39
Figura 3.1	Espectro básico OFDM en dominio de tiempo y frecuencia	41
Figura 3.2	Desviación de portadoras OFDM	41
Figura 3.3	Modulación OFDM	42
Figura 3.4	Grid OFDM tiempo-frecuencia	42
Figura 3.5	Demodulación OFDM básica	43
Figura 3.6	Inserción del Prefijo cíclico	44
Figura 3.7	Generación de la señal DFTS-OFDM	45

Figura 3.8	Demodulación de la señal DFTS-OFDM	46
Figura 3.9	Programación enlace descendente de la señal DFTS-OFDM	47
Figura 3.10	(a) control de potencia y (b) control de velocidad	49
Figura 3.11	Programación canal dependiente	50
Figura 3.12	Ejemplo de Coordinación de interferencia entre las células	52
Figura 3.13	Ejemplos, (a) Chase combining y (b) Incremental Redundancy	54
Figura 3.14	Técnicas de Múltiples antenas en LTE	56
Figura 3.15	Escenario Broadcast	57
Figura 3.16	(a) FDD vs. (b) TDD, enlace ascendente y descendente	58
Figura 3.17	Estructura de la trama	59
Figura 3.18	Flexibilidad del espectro LTE	60
Figura 3.19	Actuales bandas 3GPP, con rojo principalmente para LTE	61
Figura 3.20	Constelaciones de modulación en LTE	62
Figura 3.21	Modulación adaptativa	63
Figura 4.1	Núcleo de red (CN) y Red de acceso radio (RAN)	64
Figura 4.2	Topología de la red de transporte influyendo en la asignación de funciones	68
Figura 4.3	Red de acceso radio WCDMA/HSPA: nodos e interfaces	69
Figura 4.4	Roles de RNC	70
Figura 4.5	Red de acceso radio LTE: nodos e interfaces	72
Figura 4.6	Descripción simplificada del Core Network GSM y WCDMA/HSPA	74
Figura 4.7	Roaming en GSM y WCDMA/HSPA	77
Figura 4.8	Descripción simplificada del Core Network SAE de LTE	79
Figura 4.9	Elementos funcionales e interfaces del EPC	80
Figura 4.10	Función S1 flexibility	82
Figura 4.11	WCDMA/HSPA conectada con LTE/SAE	84
Figura 4.12	Arquitectura de protocolo LTE	85
Figura 4.13	Segmentación y Concatenación RLC	87
Figura 4.14	Ejemplo de mapeado de los canales lógicos-transporte	90
Figura 4.15	Estados LTE	93
Figura 4.16	Flujos de datos LTE	94

Figura 4.17	División Funcional entre E-UTRAN y EPC	95
Figura 4.18	Arquitectura de Servicio de portador SAE	96
Figura 5.1	Pruebas del Proof of Concept de LTE	99
Figura 5.2	Velocidades peak de los datos medidos en diferentes proveedores LSTI	100
Figura 5.3	Impactos del Tput sobre le usuario final	102
Figura 5.4	Respuesta de diferentes frecuencias e incremento del Tput	103
Figura 5.5	Tput en la capa de aplicación Modulación adaptativa	103
Figura 5.6	Velocidades de datos esperadas, basadas en mediciones de laboratorio	104
Figura 5.7	Latencia del plano de control	106
Figura 5.8	Latencia del plano de usuario	106
Figura 5.9	Latencia en la interfaz aire y de extremo a extremo en el plano de usuario	107
Figura 5.10	Soporte VoIP, servicio Best effort y pruebas de desempeño	108
Figura 5.11	Demostraciones de Handover LSTI	109
Figura 5.12	Interfaces analizadas en la Prueba de Interoperabilidad	111
Figura 5.13	Resumen de la duración de la Actividad LSTI	112
Figura 5.14	Impulso global de LTE	113
Figura 5.15	Tour móvil comercial de LTE	113
Figura 5.16	Aplicaciones MBMS	117
Figura A2.1	Proceso simplificado de la capa PHY para DL-SCH y UL-SCH	127
Figura A3.1	Simulación de una portadora de 20 MHz y de 5 MHz	130
Figura A4.1	Participantes LSTI	131

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁG.
Tabla 2.1	Diferentes Aspectos Inalámbricos	22
Tabla 2.2	Características de las tecnologías 3GPP	24
Tabla 2.3	Rendimiento de las diferentes tecnologías 3GPP	27
Tabla 2.4	Rendimiento de las tecnologías 3GPP2	30
Tabla 2.5	Rendimiento de la tecnología WiMAX	31
Tabla A1.1	Recomendaciones UIT-R de las IMT-2000	124
Tabla A3.1	Metas para el desempeño LTE en TR25.913	129
Tabla A3.2	Hipótesis para los resultados de la Figura A3.1	130
Tabla A5.1	Bandas asignadas a los operadores	132
Tabla A5.2	Espectro asignado y por asignar a móviles de banda ancha	133

GLOSARIO

- 3GPP: 3rd Generation Partnership Project
- 3GPP2: 3rd Generation Partnership Project 2
- ARIB: Association of Radio Industries and Businesses
- ATIS: Alliance for Telecommunication Industry Solutions
- CCSA: China Communications Standards Association
- CDMA: Code Division Multiple Access
- CDMA2000: Code Division Multiple Access 2000
- EDGE: Enhanced Data Rates for GSM Evolution
- E-UTRAN: evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
- ETSI: European Telecommunications Standards Institute
- EV-DO: Evolved Data Optimized
- FDD: Frequency Division Duplex
- FRAMES: Future Radio Wideband Multiple Access System
- GPRS: General Packet Radio Services
- GSM: Global System for Mobile communication
- HARQ: Hybrid Automatic Repeat-reQuest
- HSPA: High Speed Packet Access
- HSDPA: High Speed Downlink Packet Access
- HSUPA: High Speed Uplink Packet Access
- HSS: Home Subscriber Server
- IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers
- IPTV: Internet Protocol Television
- LTE: Long Term Evolution
- MBMS: Multimedia Broadcast Multicast Service
- MBSFN: Multicast-Broadcast Single-Frecuency Network
- MIMO: Multiple Input Multiple Output
- MME: Mobility Management Entity

- NGMN: Next Generation Mobile Networks
- OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
- PAPR: Peak to Average Power Ratio
- PCI: Peripheral Component Interconnect
- PCRF: Policing and Charging Rules Function
- PDSN: Packet Data Serving Node
- PDC: Personal Digital Cellular
- PS: Packet Switched
- QoS: Quality of Service
- QAM: Quadrature Amplitude Modulation
- QPSK: Quadrature Phase-Shift Keying
- RAN: Radio Access Network
- RTT: RadioTransmission Technology
- SAE: System Architecture Evolution
- SC-FDMA: Single Carrier Frequency Division Multiple Access
- SGSN: Serving GPRS Support Node
- TDD: Time Division Duplex
- TDMA: Time Division Multiple Access
- TIA: Telecommunications Industry Association
- TTA: Telecommunications Technology Association
- TTC: Telecommunication Technology Committee
- TTI: Transmission Time Interval
- UMB: Ultra Mobile Broadband
- UMTS: Universal Mobile Telecommunications System
- UTRA: Universal Terrestrial Radio Access
- UTRAN: Universal Terrestrial Radio Access Network
- WCDMA: Wideband Code Division Multiple Access
- WLAN: Wireless Local Area Network

RESUMEN

La presente Tesis expone el amplio estudio teórico de la nueva tecnología móvil llamada LTE. Primero que todo, se debe mencionar que esta tecnología de tercera generación aún no se encuentra implementada en nuestro país, por lo cual el desarrollo de este trabajo esta enfocado a mostrar las características más importantes de esta tecnología, considerando sus principales ventajas y desventajas, así como también sus actividades en países donde se espera su desarrollo.

La metodología de trabajo utilizada, fue la búsqueda de información vía Internet de libros, papers, y documentos de empresas y organismos relacionados con la tecnología en si, aportando información clave para la elaboración de este trabajo.

LTE es el último estándar en tecnología de redes móviles y asegurará la competitividad del 3GPP en el futuro, pudiendo ser considerada una tecnología puente entre las redes 3G/3.5G actuales y las futuras redes 4G, de las que se espera alcanzar velocidades de hasta 1 Gbps. Proporcionará a los operadores una arquitectura simplificada pero robusta a la vez, soportando servicios de tecnología IP, ya que este tipo de aplicaciones son las que dominarán el mercado de las telecomunicaciones inalámbricas.

Su objetivo principal es proporcionar un sistema móvil capaz de alcanzar tasa de transferencia de datos de hasta 100 Mbps en enlace descendente y de 50 Mbps en enlace ascendente. LTE opera en frecuencias con anchos de banda variables hasta los 20 MHz. Además, ofrecerá una baja latencia con el objeto de reducir los tiempos de acceso a un servicio y la respuesta de la red a cualquier solicitud. Adicionalmente a estas mejoras técnicas, el aspecto económico también es importante en el desarrollo de LTE, incluyendo costos de despliegue y puesta en servicio así como la migración de estaciones UMTS a LTE. La coexistencia y cooperación de tecnologías como GSM/GPRS es también un requerimiento importante. LTE no implica sólo a la red radio si no también al núcleo de red, por esto el grupo de trabajo denominado SAE, trata de encontrar la solución óptima de red capaz de soportar estos cambios. LTE utiliza nuevos métodos de transmisión y modelos que han sido completamente reformados para conseguir una arquitectura menos compleja que la existente para UMTS.

ABSTRACT

This thesis outlines the broad theoretical study of the new mobile technology called LTE. First of all, I should mention that this third generation technology is not yet implemented in our country, thus, the development of this work is focused on showing the features of this technology, considering its main advantages and disadvantages, as well as its activities in countries where development is expected.

The working methodology was to search for information via the Internet of books, papers and documents of companies and organizations related to technology itself, providing key information for the preparation of this work.

LTE is the latest standard in wireless networking technology and will ensure the competitiveness of 3GPP in the future, may be considered a technology bridge between the networks 3G/3.5G current and future 4G networks, which are expected to reach speeds up 1 Gbps. Provide operators with a simplified architecture at a time but robust, supporting IP technology services, as these applications are those that dominate the market for wireless telecommunications.

Its main objective is to provide a mobile system capable of data transfer rate up to 100 Mbps downlink and 50 Mbps uplink. LTE operates at frequencies with variable bandwidths to 20 MHz also offers low latency in order to reduce access times to a service and network response to any request. In addition to these technical improvements, the economic aspect is also important in the development of LTE, including costs of deployment and commissioning as well as migration to LTE UMTS stations. The coexistence and cooperation of technologies such as GSM/GPRS is also an important requirement. LTE is not only about the radio network but also the core network, therefore the working group called SAE, to find the optimal solution of network supporting these changes. LTE uses new transmission methods and models that have been fully refurbished to achieve an architecture less complex than existing UMTS.

INTRODUCCION

Sistemas de telecomunicaciones de segunda generación, tales como el Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM), permitieron el tráfico inalámbrico de voz. Actualmente el número de teléfonos móviles excede el número de teléfonos fijos y la penetración de la telefonía móvil se acerca 100% en varios mercados. Este crecimiento explosivo en el número de usuarios de telefonía móvil, unido al estado tecnológico actual hace pensar en una fuerte demanda de aplicaciones móviles de banda ancha, tales como; la navegación por Internet de alta velocidad, el envío y recepción de e-mail; la televisión en el móvil; la descarga rápida de contenidos multimedia o los juegos interactivos. Satisfacer dicha demanda, consiguiendo que los servicios resulten atractivos para el usuario al mismo tiempo que los operadores puedan reducir principalmente los gastos de operación, requiere continuar avanzando en el desarrollo de las redes móviles actuales.

Es así como se ha llegado a una constante evolución de la banda ancha móvil, y en el camino hacia ella se han desplegado tecnologías como GSM, GPRS, EDGE, WCDMA (UMTS), HSPA y actualmente se espera LTE, en lo que respecta a las tecnologías 3GPP. La evolución a largo plazo (*Long Term Evolution*) de UTRAN (*Universal Terrestrial Radio Access Network* – Red de Acceso de Radio Terrestre Universal) es una tecnología desarrollada para el acceso de radio de paquetes optimizados con alta velocidad de datos y baja latencia, que permite además soportar los servicios de voz.

El propósito que abarca esta Tesis es principalmente el desarrollo de un estudio teórico sobre las características técnicas y comerciales de LTE, basado en publicaciones actualizadas. Analizando la estructura necesaria para el despliegue de las redes LTE el cual se basa en la Evolución de Arquitectura del Sistema (SAE – *System Architecture Evolution*) que permite la evolución a una red *All-IP*, y soporta la continuidad de servicio y movilidad entre redes de acceso heterogéneas. También se evalúa LTE con otras tecnologías con el fin demostrar las ventajas que presenta ante ellas y se investigan las técnicas de acceso al medio y de modulación, todo esto con el fin de otorgar un contenido claro, preciso y conceptualmente completo.

OBJETIVOS

OBJETIVOS GENERALES

- Desarrollar una investigación teórica de las características de la nueva tecnología para el acceso inalámbrico de banda ancha móvil llamada LTE (*Long Term Evolution*).

- Estudiar la factibilidad de la implementación de esta tecnología inalámbrica en el ámbito de las telecomunicaciones y servicio móvil.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar la estructura necesaria para el despliegue de las redes inalámbricas LTE.
- Investigar las técnicas de modulación presentes en esta tecnología.
- Evaluar LTE en comparación con otras tecnologías semejantes, analizando en mayor parte aspectos técnicos y generales.
- Analizar las posibles consecuencias técnicas y económicas, en conjunto con el desarrollo, que podrían acontecer por la implementación de esta tecnología dentro del mercado nacional.
- Identificar las ventajas y desventajas considerando las características desarrolladas.

CAPÍTULO I
EVOLUCIÓN 3G

En este primer capítulo se presenta una revisión de la evolución de las redes celulares, profundizando en conceptos relacionados con las Telecomunicaciones móviles de Tercera Generación (3G) y las rutas migratorias hacia la misma. Con el fin de lograr un conocimiento previo al estudio que se llevará a cabo en los siguientes capítulos.

1.1 Antecedentes.

Desde las primeras actividades experimentales con la comunicación por radio en el año 1890, el camino que ha avanzado la comunicación por radio móvil ha sido bastante extenso. Para comprender las complejidades que poseen las tecnologías 3G móvil y los sistemas de comunicación actuales, es importante conocer como surgieron, así como también evaluar la evolución de los sistemas celulares, pasando de una costosa tecnología destinada a unos pocos individuos, a un sistema de comunicación móvil utilizado por casi la mitad de la población del mundo.

El desarrollo de las tecnologías móviles también ha cambiado, de ser un interés nacional o regional, a convertirse en una tarea mundial emprendida por organizaciones con normas en desarrollo como el *Third Generation Partnership Project* (3GPP).

Las tecnologías celulares especificadas por el 3GPP son las más desarrolladas en el mundo, con un número de usuarios que sobrepasa los 2 mil millones en el año 2006. El último estudio desarrollado en el 3GPP, es una evolución del acceso de radio de 3G que se refiere como a la evolución a largo plazo (LTE) y la evolución de paquetes de acceso de núcleo de red (SAE), de los cuales entre los años 2009 y 2010 se espera el primer despliegue de estas evoluciones.

1.1.1 Antes de 3G.

Todo comenzó hace varias décadas con el despliegue de servicios celulares analógicos. En los EE.UU. la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) aprobó el primer comercial autoservicio de telefonía cargo en el año 1946, operado por AT&T. En el año 1947 AT&T también introdujo un concepto de reutilización de las frecuencias celulares de radio, que pasó a ser fundamental en todo los sistemas de comunicaciones móviles [22].

Los primeros pasos en el camino de las comunicaciones fueron dominados por el monopolio telefónico, que se desarrollo a causa de la gran absorción de los abonados, lo que produjo que el uso de de las comunicaciones móviles se convirtiera en una preocupación internacional, invitando a la industria a participar en el proceso.

El primer sistema de comunicación móvil internacional es el sistema analógico NMT (*Nordic Mobile Telephony*) que se introdujo en los países nórdicos en el año 1981, al mismo tiempo en Norteamérica fue introducido el sistema analógico AMPS (*Advanced Mobile Phone System*). Otras tecnologías celulares analógicas fueron desplegadas por todo el mundo, tales como TACS (*Total Access Communication System*) y J-TACS (*Japanese Total Access Communication System*). Todos ellos tenían un equipo de características similares, con una calidad de sonido deficiente, existiendo el *Crosstalk* entre los usuarios, el cual fue un problema común, incluyendo además que era de gran tamaño y muy poco estético. Con un sistema internacional, como NMT llegó el concepto de *roaming* o itinerancia, entregando también servicios para usuarios que viajan fuera del área local de su operador. Esto originó un mercado más amplio para la telefonía, captando así a más empresas en el área de las comunicaciones móviles.

Los sistemas celulares analógicos se apoyaron en el "Servicio Telefónico Tradicional o Telefonía Básica", siendo éste de gran importancia en relación con algunos servicios adicionales que se exigían. Con la llegada de la comunicación digital durante la década de los 80, apareció la oportunidad de desarrollar los sistemas y normas de una segunda generación de comunicaciones móviles.

En Europa, la administración de telecomunicaciones CEPT1, inició el GSM (*Global System for Mobile communications)* y así desarrollar un proyecto para todo el continente europeo basado en el sistema de telefonía móvil. GSM continuó con sus actividades en 1989 en la recién creada ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*). Después de evaluar las propuestas dadas a mediados de la década de los 80, las cuales fueron TDMA, CDMA y FDMA, la última norma GSM se basa en TDMA.

El desarrollo de un estándar celular digital fue realizado simultáneamente por TIA (*Telecommunications Industry Association*) en los EE.UU., dando lugar a TDMA basado en el estándar IS-54, el cual se hace referencia más adelante como US-TDMA. Un poco más tarde el desarrollo de CDMA con un estándar denominado IS-95 fue completado por la TIA en 1993 [11]. En Japón, la segunda generación del estándar TDMA también se desarrolló, el que se refiere por lo general a PDC.

Todos estos estándares eran de banda estrecha, orientado hacia un ancho de banda reducido para los servicios de voz. Con la segunda generación llegó la oportunidad de ofrecer servicios sobre datos en redes de comunicaciones móviles. Los principales servicios de datos introducidos en 2G son: el mensaje de texto (SMS) y el circuito de conmutación de paquetes de datos, que permite el servicio del correo electrónico y otras aplicaciones. La velocidad *peak* de la transmisión de datos en 2G inicialmente fue de 9,6 Kbps. Las altas velocidades de transmisión de datos se introdujeron más tarde en los evolucionados sistemas 2G, mediante la asignación de múltiples *time slots* a un usuario y por los modificados sistemas de codificación.

Los paquetes de datos por medio de los sistemas celulares se convirtieron en una realidad durante la segunda mitad del año 1990, con el GPRS (*General Packet Radio Services*) introducido en el GSM y los paquetes de datos que también son incluidos a las demás tecnologías celulares, como el estándar japonés PDC (*Personal Digital Cellular*). Estas tecnologías son a menudo llamadas 2.5G. El éxito del servicio iMode de Japón sobre los datos inalámbricos, dio una indicación muy clara del potencial sobre las aplicaciones de paquetes de datos en sistemas móviles, a pesar de la baja velocidad de transmisión de datos que se respaldaba en ese momento.

Con la aparición de 3G y el ancho de banda superior de la interfaz radio de UTRA, fue posible una gran gama de nuevos servicios que sólo habían sido mencionados en 2G y 2.5G. El desarrollo de 3G actualmente es manejado por el 3GPP, sin embargo, los pasos iniciales para 3G fueron realizados a principios del año 1990, mucho antes que se formara el 3GPP. La internacionalización de las normas y estándares fue un factor importante en determinar las bases de 3G. GSM empezó como un proyecto paneuropeo, pero pronto atrajo el interés de todo el mundo cuando GSM se desplegó en una serie de países fuera de Europa. En la actualidad GSM está desplegada en más de 160 países en todo el mundo.

1.1.2 Primeras Recomendaciones de 3G.

El trabajo sobre 3G se inició en la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) en la década de los 80, en donde el Sector de Radiocomunicaciones (UIT-R) emitió la primera recomendación a través del GT8F (Grupo de Trabajo 8F) que fue definida como Futuros Sistemas de Telecomunicaciones Móviles Terrestres Públicos (FPLMTS) en el año 1990, el cual fue revisado completamente para la especificación de todas las redes de protocolos en el año 1997. Dentro de la UIT-R el FPLMTS fue examinado para ser cambiado hacia la terminología IMT-2000 (*International Mobiles Telecomunications 2000*), con el fin de poder reflejar con mayor precisión lo que se espera de un sistema de tercera generación, definiéndolo así como un estándar mundial para comunicaciones inalámbricas. La asignación del espectro para las IMT-2000 se realizó en la Conferencia Mundial del año 1992, asignando 230 MHz, de los cuales 155 MHz corresponden al uso terrestre y el resto del espectro fue reservado para servicios satelitales.

El Grupo de Trabajo 8F dentro de la UTI-R ha desarrollado una serie de recomendaciones relacionadas con arquitecturas de red, definiendo sistemas de servicios, requerimientos de interfaces radio, consideraciones sobre el espectro, y evaluación de la metodología. Todo esto definidas tanto como para las terrestres y satelitales.

Los criterios de evaluación para establecer los objetivos de las velocidades de transmisión de datos para 3G sobre conmutación de circuitos y conmutación de paquetes de datos, fueron:

- Hasta 2 Mbps en un medio de ambiente de interiores.
- Hasta 144 Kbps en un entorno peatonal.
- Hasta 64 Kbps en un entorno vehicular.

Estas cifras sirvieron de referencia para todas las tecnologías que se compararon con 3G. Sin embargo, en la actualidad los tipos de velocidades de transmisión de datos van mucho más allá de 2 Mbps, gracias al despliegue visto de los sistemas 3G.

1.1.3 La Investigación sobre 3G.

En paralelo con el amplio despliegue y evolución de sistemas de comunicación móvil 2G en el año 1990, fueron puestos grandes esfuerzos en las actividades sobre investigación de 3G.

En Europa, la Comisión de la Unión Europea (EU) financia principalmente el programa llamado Investigación y Desarrollo en Tecnologías avanzadas de las Comunicaciones en Europa (RACE), llevando a cabo la primera fase de la investigación inicial en donde 3G fue nombrada como Sistema Universal de Comunicaciones Móviles (UMTS).

En la segunda fase de RACE, el proyecto CODIT (*Code Division Testbed*) y el proyecto ATDMA (*Advanced TDMA Mobile Access*) fueron desarrollados como conceptos basados en tecnologías *Wideband* CDMA (WCDMA) y *Wideband* TDMA.

La siguiente fase en relación con la investigación europea fue el ACTS (Tecnología y Servicios de Comunicación Avanzados), que llevó a cabo el proyecto *Future Radio Wideband Multiple Access System* (FRAMES), que fue el único en trabajar con la componente terrestre de la interfaz radio de UMTS. La definición del esquema de acceso múltiple original de FRAMES (FMA), satisfacía los requerimientos que debía cumplir para los sistemas de radio móvil terrestre de 3G. El FRAMES se completó en el año 1996, en base a decisiones en diferentes partes del mundo, y además combinó tecnología WCDMA y TDMA de banda ancha, con o sin esparcimiento.

Al mismo tiempo, en otras partes del mundo también ocurren actividades de investigación 3G. En Japón, la Asociación de Industrias de Radio y Negocios (ARIB) estaba en el proceso de definición de una tecnología de comunicación inalámbrica 3G basado en WCDMA. Corea también comenzó a trabajar en WCDMA en ese momento, y en EE.UU. se desarrolló como concepto llamado WIMS (*WWW Interactive Multipurpose Server*).

El proyecto FRAMES fue presentado a las actividades de estandarización para 3G en la ETSI, cuando otras propuestas de múltiple acceso también fueron introducidos por la industria. Las propuestas del ETSI se fusionaron en cinco grupos, significando esto también que las propuestas de WCDMA de ambos países, EE.UU. y Japón, hicieran lo mismo entre ellos.

La estandarización de WCDMA fue desarrollada en paralelo en la ETSI y la ARIB a fines del año 1998. Con esto se mantuvo un despliegue paralelo de las especificaciones en diversas regiones, llegando a la organización actual de los socios de 3GPP que son ARIB, CCSA, ETSI, ATIS, TTA y TTC.

1.2 Estandarización.

1.2.1 Proceso de Estandarización.

Establecer un estándar para comunicaciones móviles no es una tarea simple, ésta debe seguir un continuado proceso. Los foros de estandarización están en constante cambio de sus estándares, para tratar de satisfacer las nuevas demandas de servicios y funciones. Este proceso es diferente en los distintos foros, pero incluye las cuatro fases que se ilustran en la Figura 1.1:

1. **Requisitos**, donde se decide lo que se debe lograr con el estándar.
2. **Arquitectura**, donde son decididos los principales bloques de construcción y las interfaces.
3. **Especificaciones Detalladas**, donde cada interfaz es específicamente detallada.
4. **Ensayos y Verificación**, donde las especificaciones de la interfaz han demostrado el resultado del trabajo en la vida real.

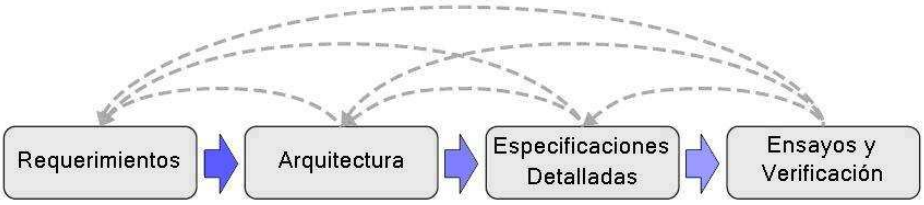

Figura 1.1 *Fases de estandarización y el proceso iterativo.*

Estas fases pueden iterarse y además superponerse. Por ejemplo, pueden ser incorporados, modificados o disminuidos durante las últimas fases, si las soluciones técnicas lo requieren. Del mismo modo, las soluciones técnicas en las especificaciones detalladas pueden cambiar debido a los problemas encontrados en la fase de prueba y verificación.

La estandarización se inicia con la fase de requisitos, donde el organismo de estandarización decide lo que debe lograrse con la norma o estándar. Esta fase suele ser relativamente corta. En la fase de la arquitectura, los estándares que se decidan acerca de la arquitectura deben cumplir en un principio con los requisitos, además se incluyen decisiones sobre los puntos de referencia y de la estandarización de la interfaz a utilizar. Esta fase suele ser bastante larga y puede cambiar los requisitos. Después nos encontramos con la fase de la especificación detallada en donde se identifican las interfaces y se dan todos los detalles de éstas. Durante este proceso, el organismo de estandarización puede encontrar que debe cambiar los aspectos que fueron tomados por las decisiones en la arquitectura, o incluso en la fase de requisitos.

Por último, se sigue con la fase de ensayos y verificación que generalmente no es una parte real de la estandarización, pero se lleva a cabo en paralelo a través de pruebas por los proveedores y pruebas de interoperabilidades entre los proveedores. Esta fase es la prueba definitiva del estándar. Durante esta etapa pueden ser encontrados los errores en el estándar y también pueden cambiar las decisiones de las otras fases. Para verificar la calidad del estándar, se necesitan los productos, por lo tanto la aplicación de estos comienza después o durante la fase de especificación detallada. La fase de ensayos y verificación termina cuando las pruebas que son estables se pueden utilizar verificando que el equipo esta cumpliendo con la norma o estándar. Usualmente, esto se tarda entre uno a dos años a partir del momento en que el estándar es

completado en su totalidad hasta que los productos comerciales estén en el mercado. Sin embargo, si el estándar comienza a partir de cero, es posible que tarde más tiempo por el hecho que no hay componentes ya establecidos de donde se pueda comenzar.

1.2.2 3GPP

El 3GPP es el organismo que desarrolla los estándares que especifican el 3G de UTRA y los sistemas GSM. 3GPP se inició en el año 1998 y es una asociación de proyectos de tercera generación formada por los siguientes organismos de estandarización que son:

ETSI:	Instituto Europeo de Estándares y Telecomunicaciones	Europa
ARIB:	Asociación de Industrias de Radio y Negocios	Japón
TTA:	Asociación de Tecnología y Telecomunicaciones	Corea
CCSA:	Asociación de Estándares y Comunicaciones de China	China
ATIS:	Alianza para la Industria de Telecomunicaciones Soluciones	Norteamérica
TTC:	Comité de Tecnología y Telecomunicaciones	Norteamérica

La parte técnica del 3GPP se compone de cuatro grupos de especificación técnica o TSG (*Technical Specification Groups*), véase Figura 1.2, cada uno esta compuesto por diferentes grupos de trabajo, estos son:

El TSG RAN (Red de Acceso de Radio), este grupo trabaja en la especificación de la tecnología HSPA/LTE, se encarga de las funciones, las interfaces,y el protocolo de la red de acceso. Se compone de los siguientes grupos:

- **RAN 1,** es el responsable de la definición física (Capa 1) de la Red de Acceso de UTRAN. Esto incluye especificación de modulación, codificación de canales, mediciones de la capa física, etc.
- **RAN 2,** trabaja con los protocolos de interfaz de radio utilizado en la parte superior de la capa física. Esto incluye protocolos de la capa 2 para la transmisión de datos.

- **RAN 3,** se encarga de la arquitectura total de UTRAN. Esto incluye la definición de la interfaz entre entidades de red de acceso, así como la especificación de la red de transporte.
- **RAN 4,** es responsable de la radiofrecuencia (RF) y la gestión de los recursos de radio requisitos de funcionamiento.
- **RAN 5,** produce pruebas de especificación basadas en los documentos del RAN 4.

El TSG SA (Servicios y Aspectos del Sistema), es el responsable de la arquitectura y definición del servicio y se compone de los siguientes grupos:

- **SA 1,** está a cargo del alto nivel de servicio y requisitos característicos. Además produce documentos del sistema y capacidades de servicio, utilizados como referencia de otros grupos.
- **SA 2,** define la arquitectura de red y sus características para ser apoyado por entidades de red basado sobre los documentos del SA 1. También produce especificaciones que se utilizan como insumos por parte de grupos a cargo de las especificaciones de la interfaz detallada.
- **SA 3,** establece requisitos de seguridad para el sistema y produce especificaciones de seguridad para los algoritmos que deben aplicarse en la red.
- **SA 4,** trabaja en la especificación de idioma, audio, video y códecs multimedia aplicados a circuitos y paquetes.
- **SA 5,** especifica la arquitectura, los procedimientos de lo relacionado con la gestión de la interfaz de red, incluidos la configuración y gestión de desempeño.

El TSG CT (Núcleo de Red y Terminales), se encarga del núcleo de red y especifica los protocolos del acceso de red. Se compone de los siguientes grupos:

- **CT 1,** especifica los protocolos de la capa 3 que se utilizan entre el núcleo de red, y los terminales para establecer sesiones de comunicación de circuitos.
- **CT 3,** está a cargo de la interconexión de redes de trabajo, entre redes 3GPP y redes de circuitos o paquetes externos. Esto incluye señalización o protocolo de interconexión.
- **CT 4,** está a cargo de las definiciones de servicios complementarios tales como transferencia de llamadas o SMS.

- **CT 5,** trabaja con UMTS OSA (Open Service Access o Servicio de Acceso Abierto) y produce Aplicaciones de Programación de Interfaces para facilitar los servicios UMTS.
- **CT 6,** es el responsable del formato del Módulo de Identidad del Suscriptor (SIM), especificando los datos del contenido de la tarjeta SIM y su organización.

El TSG GERAN (GSM/EDGE de Red de Acceso de Radio), es el responsable de la evolución de GSM/EDGE basada en Red de Acceso de Radio. Como UMTS viene de la tecnología GSM, es muy significativa para un núcleo de red y para servicios de gran expectativa. Esta es la razón por la que este grupo técnico parte inicialmente del ETSI y finalmente se traslada a la organización 3GPP a finales del 2000. Se compone de los siguientes grupos:

- **GERAN 1,** es el equivalente de RAN 1 y define la interfaz física del acceso de red GSM/EDGE.
- **GERAN 2,** es el equivalente de RAN 2 y trabaja en la definición de los protocolos de radio.
- **GERAN 3** está a cargo de la aprobación de especificación de pruebas del acceso de red.

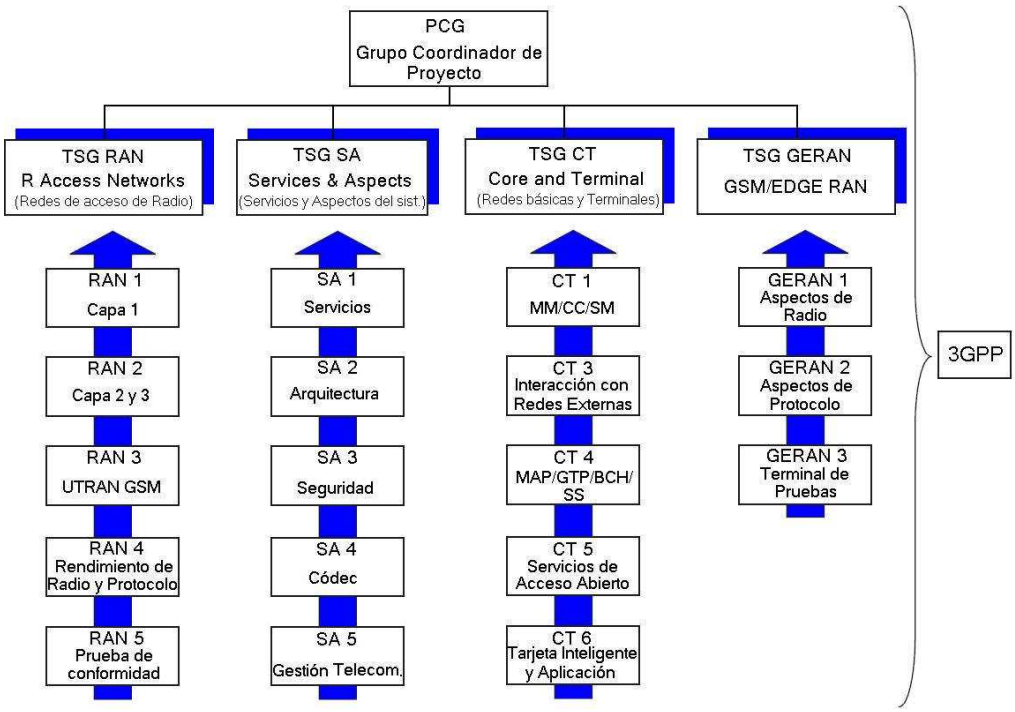

Figura 1.2 *Estructura del 3GPP [4].*

En el ámbito de aplicación de UMTS evolucionado, la estructura del 3GPP no tendrá cambios. Todos los TSG y la mayoría de sus Grupos de trabajo ampliarán su alcance con el fin de cubrir con todos los requisitos y especificaciones de la Evolución de UMTS.

Existe también un proyecto paralelo llamado 3GPP2 el cual se formó en el año 1999 y tiene la responsabilidad de desarrollar las especificaciones de 3G, pero para CDMA2000, que es la tecnología 3G del CDMA de 2G, basada en el estándar IS-95. Este proyecto global también tiene la participación de la organización de socios como el ARIB, CCSA, TIA, TTA y TTC.

El campo de aplicación de 3GPP en su inicio fue la producción mundial de especificaciones para un sistema móvil 3G basado en el núcleo de red de GSM evolucionado, incluyendo WCDMA y TD-CDMA. La tarea de mantener y desarrollar GSM/EDGE se ha agregado en una etapa posterior en el 3GPP.

El trabajo en el 3GPP se lleva a cabo en la UIT en cuenta de las recomendaciones y de los resultados obtenidos, además los socios están obligados a identificar las necesidades regionales que pueden dar lugar a distintas alternativas del estándar. Ejemplos de ello, son las bandas de frecuencias regionales y requisitos especiales de protección local de una región.

Las especificaciones se pueden actualizar después de cada serie de reuniones de los TSG, que se efectúan 4 veces al año. Éstas especificaciones son llamadas emisiones o versiones que son más conocidas por su nombre en ingles de Releases. Los documentos del 3GPP se dividen dentro de los Releases (ver Figura 1.3), cuando cada uno de estos tiene un conjunto de características agregadas en comparación con la versión anterior. Estas características son definidas y acordadas por Los Elementos de Trabajo y realizadas por los TSG. A continuación se presenta una breve descripción de las versiones del 3GPP.

Release 99 (Rel-99): es la primera versión de especificaciones 3G, que contiene todas las características necesarias para cumplir con los requisitos de IMT-2000 para el acceso radio de WCDMA. Además en ella se establecieron las bases para el futuro tráfico de transferencia de alta velocidad, tanto como en la conmutación de circuitos que en la conmutación de paquetes.

Release 4 (Rel-4): contiene los cambios en el dominio del núcleo de red y se crean nuevas interfaces de comunicación. Para el transporte se puede utilizar ATM o IP en el dominio de voz. Además son introducidas otras características como:

- Multimedia en el dominio de conmutación de circuitos (CS-*Circuit Switched*).
- *Handover* en tiempo real en el dominio de conmutación de paquetes (PS-*Packet Switched*).
- Soporte a IPv6 como opcional y MMS.

.

Release 5 (Rel-5): describe la mejor velocidad del canal de datos para el enlace descendente (HSDPA-*High-Speed Downlink Packet Access*), que permite velocidades de hasta 14,4 Mbps y presenta la estructura de la red para que sea totalmente IP en lugar de ATM. También se introduce:

- Una Calidad de Servicio (QoS) en el dominio PS para todo el trayecto (*end to end*).
- IMS (*IP Multimedia Subsystem*): soporte de IPv6 y uso de SIP para establecer sesiones.

Release 6 (Rel-6): mejora la velocidad del enlace ascendente (HSUPA) de hasta 5,76 Mbps, introduce MBMS, e interoperabilidad entre UMTS y WLAN. Las principales mejoras son:

- Handover entre 3G y WLAN.
- MBMS (*Multimedia Broadcast Multicast Service*): servicio para texto, video, audio, etc.
- IMS fase 2: QoS para voz y multimedia.

Release 7 (Rel-7): publicado en marzo del año 2007, mejora las velocidades del enlace ascendente y descendente (HSPA+). Se utiliza MIMO que es el uso de múltiples antenas en los receptores, se define LTE. Entre las principales mejoras se encuentra:

- La utilización de 64 QAM para la modulación
- CPC: conexión de paquetes continua para usuarios de datos.
- Introducción de LTE/E-UTRAN.
- Fusión del NodoB y el RNC (*Radio Network Controller*) en la red de acceso radio.
- VoIP para celulares.
- Reducción de latencia.

Release 8 (Rel-8): se utiliza OFDMA como técnica de acceso, y un ancho de banda variable desde 1,25 MHz hasta 20 MHz. Entre las mejoras se tienen:

- Introducción de SAE/EPS en la arquitectura de red.
- Soporte para acceso no WCDMA.
- OFDMA como interfaz aire.
- MIMO: configuraciones de 4x4.
- *Beamforming* o configuración del haz: antenas inteligentes.
- IMS común para FMC.
- Prioridad de servicio multimedia.

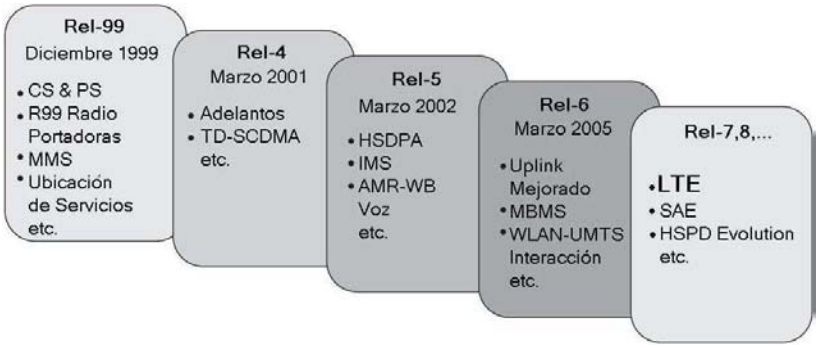

Figura 1.3 *Releases del 3GPP.*

1.2.3 Actividades de la UIT con respecto a las IMT-2000

La UIT es el organismo de las Naciones Unidas que esta encargado de regular las telecomunicaciones en el mundo, entre las distintas empresas operadoras y administradoras.

Las áreas de actividad de la UIT en IMT-2000 son:

- **Desarrollo de las Telecomunicaciones (UIT-D),** que realiza estudios y actividades de cooperación, encaminadas al establecimiento de las IMT-2000 en países en desarrollo.
- **Sector de Radiocomunicaciones (UIT-R),** que tiene encomendados estudios y la elaboración de recomendaciones sobre los aspectos radio de IMT-2000 y posteriores sistemas.

- **Sector de Normalización (UIT-N),** que se ocupa de estudios relativos a los aspectos de red y aplicaciones de IMT-2000 que son; convergencia de servicios fijo-móvil, gestión de la movilidad, funciones multimedia móviles, interfuncionamiento de servicio, interoperabilidad de equipos e Internet móvil.

Para la normativa de Radiocomunicaciones, los trabajos los ha desarrollado la Comisión de Estudio 8 de Servicios Móviles del UIT-R, dentro de éste se establece el Grupo de Tareas especiales 8 (*Task Group*) dedicado a IMT-2000, el cual trabaja apoyado tanto del UIT-R como del sector de normalización UIT-T.

Las IMT-2000 se pueden especificar mediante un conjunto de recomendaciones interdependientes de la UIT, proporcionando el marco para un acceso inalámbrico mundial enlazando diversos sistemas de redes terrestres y satelitales. La serie de Recomendaciones de IMT-2000 (ver Tabla A1.1) define un marco de referencia para el desarrollo de los sistemas 3G, también establece una serie de objetivos, descripción de servicios, características generales de las interfaces radio, requisitos de espectro, circulación de terminales, y requisitos de compatibilidad electromagnética.

Las especificaciones de las interfaces radio se han ido desarrollando en diversas Recomendaciones del UIT-R. La recomendación UIT-R M-1455 define las características fundamentales de las interfaces radio de IMT-2000. La M-1455 contiene características básicas propuestas, da una lista de los valores recomendados en diferentes magnitudes. Esta recomendación expresa que la interfaz radio de IMT-2000 sería un estándar único, con diversas modalidades de funcionamiento, que podrían clasificarse en CDMA, TDMA o una combinación de ambos. El grupo CDMA incluye sistemas monoportadora DS-CDMA con FDD, TDD y sistemas FDD multi-portadora.

La principal recomendación es la Recomendación UIT-R M.1457, que identifica a las especificaciones detalladas de la interfaz radio de IMT-2000. La recomendación contiene una familia o conjunto de cinco interfaces radio terrestres las que se muestran en la Figura 1.4, como también las organizaciones que desarrollan las especificaciones.

IMT-2000 Interfaces Radio Terrenales (Recomendación UIT-R M.1457)

Nombre Completo	Nombre Común	Organización
Ensanchamiento directo del CDMA de las IMT-2000	UTRA FDD	3GPP
Multiportadora CDMA para las IMT-2000	CDMA 2000	3GPP2
IMT-2000 CDMA TDD	UTRA TDD	3GPP
Portadora única TDMA IMT-2000	UWC 136	ATIS/TIA
FDMA/TDMA en las IMT-2000	DECT	ETSI

Figura 1.4 *Interfaces Radio Terrestres IMT-2000.*

En cada interfaz radio se ha desarrollado el proceso de evaluación, convergencia y consecución de los objetivos de calidad para los diferentes entornos radio operacionales, asegurando la compatibilidad mundial y la itinerancia internacional.

Con el continuo desarrollo de las interfaces radioeléctricas IMT-2000, incluyendo la evolución de UTRA a E-UTRA (UTRA evolucionado), las recomendaciones de la UIT también deben ser actualizadas. El Grupo de Trabajo 8F, revisa continuamente la Recomendación M.1457. En el año 1999 se aprobaron las cinco interfaces para IMT-2000 de la Figura 1.4 y en el año 2007 se adiciono WiMAX móvil como la sexta interfaz llamada "IMT-2000 OFDMA TDD WMAN". Además del mantenimiento de las especificaciones de las IMT-2000, la actividad principal del UIT-R Grupo de Trabajo 8F, es el desarrollo sobre los posteriores sistemas a las IMT-2000, nombrado actualmente como IMT-Avanzadas. En este desarrollo se incluyen estudios de los servicios y tecnologías, las previsiones del mercado, principios de estandarización, estimación de las necesidades del espectro y la identificación de bandas de frecuencias candidatas para las IMT-Avanzadas. El trabajo espectral también implica intercambio de estudios entre las IMT-Avanzadas y otras tecnologías inalámbricas.

1.3 Espectro de 3G

El trabajo en el desarrollo del espectro de los sistemas móviles 3G, comenzó cuando la Conferencia Mundial de Radio (CMR) de la UIT en el año 1992, identificó las frecuencias que estaban disponibles para su utilización en futuras IMT-2000, alrededor de los 2 GHz. El objetivo 3G original es una única y global interfaz aire de IMT-2000. En la práctica, los sistemas 3G están más cerca de este objetivo que cuando eran 2G, ya que WCDMA ha resultado ser la más dominante del estándar IMT-2000 dentro del despliegue comercial.

La mayoría de los desarrollos de WCDMA han sido especificados en el espectro para 3G, que identifica las bandas de frecuencias 1885-2025 MHz y 2110-2200 MHz (ver Figura 1.5), como destinadas a ser utilizadas por las administraciones nacionales que deseen aplicar las IMT-2000.

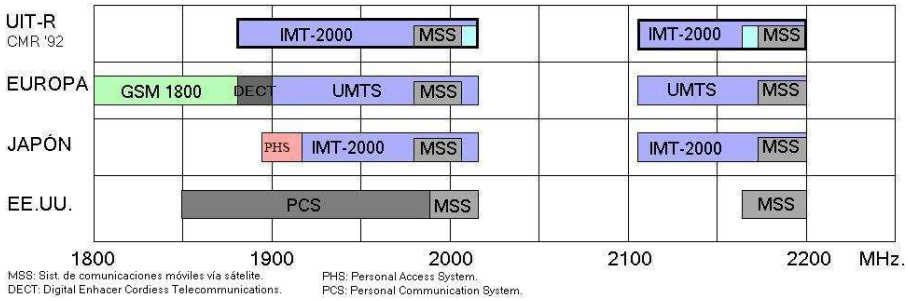

Figura 1.5 *Espectro de frecuencias asignado.*

La resolución, algo disconforme entre las regiones de las bandas de frecuencia asignado para 3G, significa que no hay una banda única que pueda ser utilizada para la itinerancia 3G en todo el mundo. Grandes esfuerzos, sin embargo, se han puesto en la definición de un pequeño conjunto de bandas, que pueden ser utilizadas para facilitar la itinerancia y así los dispositivos multi-banda pueden prestar una mayor eficiencia a este tipo de servicio mundial.

Un espectro adicional para las IMT-2000 fue identificado en la Conferencia Mundial de Radio del año 2000 (CMR-2000), donde se consideró la necesidad de adicionar 160 MHz de espectro, esto fue previsto por la UIT-R. Además se estableció que WCDMA se desplegaría en

las bandas existentes de frecuencia 2G identificadas por las IMT-2000 y que son utilizadas actualmente por GSM. Este enfoque se denomina reorganización, el cual ayudó en parte en el despliegue de WCDMA en los EE.UU., en las bandas celulares existentes en 850 MHz y de la banda PCS en los 1900 MHz, ya que no hubo nuevas frecuencias disponibles para este despliegue. También esta reorganización WCDMA en bandas GSM ha comenzado en Europa y en Asia.

Los acuerdos de frecuencia en todo el mundo se describen en la recomendación UIT-R M.1036, en ella se pueden identificar que partes del espectro de frecuencia son bandas emparejadas (*paired bands*) y cuales son bandas no emparejadas (*unpaired bands*). Para el espectro de bandas emparejadas, las bandas de frecuencia de enlace ascendente y descendente, se identifican por el manejo de División de Frecuencia Duplex (FDD). Las bandas no emparejadas, por ejemplo, pueden utilizar División de Tiempo Duplex (TDD). Hay que tener en cuenta que la banda con mayor despliegue global 3G sigue siendo la de 2 GHz.

El 3GPP definió por primera vez los 2 GHz en el UTRA Rel-99, con las bandas de frecuencia para UTRA FDD y UTRA TDD (ver Figura 1.6).

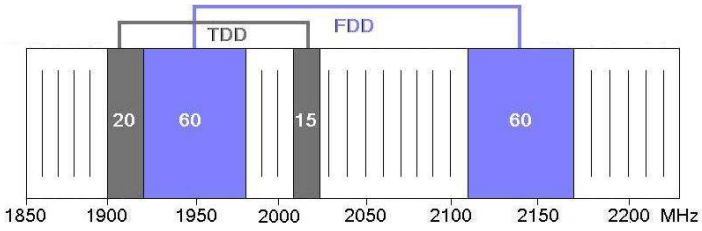

Figura 1.6 *Banda FDD conocida como WCDMA y TDD como TD-CDMA.*

FDD se usa en las componentes emparejadas de la banda IMT-2000, de las cuales, la bandas 1920-1980 MHz representan el enlace ascendente y 2110-2170 MHz el descendente. TDD se usa en las componentes no emparejadas ocupando las frecuencias de 2010 MHz a 2025 MHz y 1900 MHz a 1920 MHz. Esto da una disponibilidad de 60+60 MHz para FDD con 12 portadoras y de 15+20 MHz para TDD con 7 portadoras.

La nueva banda IMT-2000 (ver Figura 1.7) esta alrededor de 2.6 GHz con un total de 190 MHz del espectro, que son disponibles para el despliegue de las IMT-2000 y otros sistemas móviles. En Europa, el espectro incluye 2+70 MHz para los sistemas FDD y 50 MHz de espacio vació en el medio que puede ser utilizado, por ejemplo, para TDD. El mismo espectro de 2.6 GHz también esta disponible para el uso de móviles, incluyendo IMT-2000 en los EE.UU.

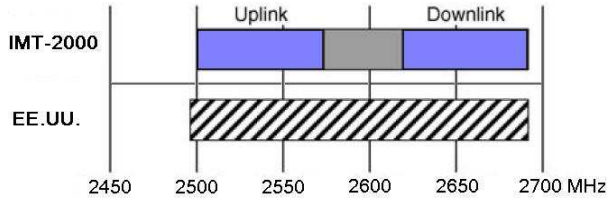

Figura 1.7 *Frecuencias asignadas alrededor de 2.6 GHz.*

1.4 Evolución del Sistema.

GSM y WCDMA en conjunto representan el 85% de las suscripciones móviles mundiales, y su participación sigue creciendo. WCDMA está diseñado para coexistir con GSM, incluyendo un ininterrumpido *handover* y terminales de modo dual. La mayoría de la redes WCDMA están desplegadas en la actual red GSM. EDGE y EDGE *Evolution* pueden ser desarrollados de manera eficiente junto con WCDMA y su evolución. De la misma manera, LTE esta diseñado para coexistir con GSM y WCDMA.

Las CDMA 2000, en lo que les corresponde sobre el mercado a nivel mundial en términos de abonados a servicios móviles, ha disminuido desde el año 2004 y actualmente tiene un ligero incremento del 10%. Una serie de grandes operadores CDMA se han convertido a GSM/WCDMA en lo que respecta a la evolución de voz, obteniendo acceso a los beneficios del extenso ecosistema GSM/WCDMA, a la economía de escala, y al bajo costo de los dispositivos móviles. La solución de CDMA, EV-DO, ahora se encuentra desarrollada comercialmente. Para promover la evolución, un número de operadores CDMA están enfocados en las tecnologías; HSPA, WiMAX y/o 3GPP LTE. El alto nivel de la evolución de sistema se ilustra en la Figura 1.8.

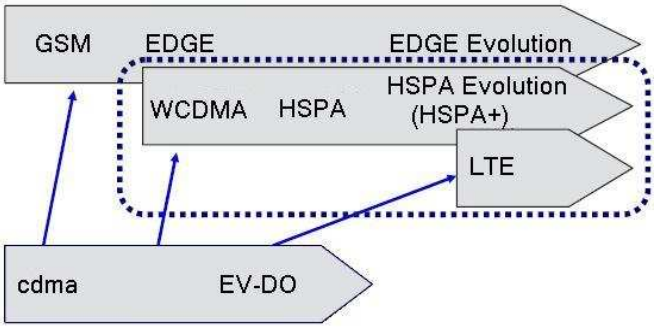

Figura 1.8 *Sistemas de la Evolución.*

Mirando hacia atrás en la historia GSM, varios países han llegado a más del 80% de penetración de la telefonía celular, y la cuenta mundial de abonados GSM superó los 2 mil millones el año 2006, quince años después de la apertura de la primera red. Las experiencias anticipadas de GSM, demostraron que las tasas de crecimiento son muy elevadas cuando se tiene terminales atractivos, de pequeño tamaño y además que posean un bajo consumo de energía. Tomó cerca de siete años para que GSM alcance los 100 millones de abonados y a WCDMA tan solo seis años. Actualmente, existen más de 150 redes comerciales WCDMA con más de 130 millones de subscriptores.

1.5 Arquitectura del Sistema Evolucionado.

Aproximadamente al mismo tiempo de la evolución de HSPA y el inicio de LTE, el 3GPP decidió asegurarse de que un operador pueda coexistir fácilmente entre HSPA y LTE a través de un núcleo de red. Este trabajo fue dirigido por el Grupo de Trabajo SA realizando el estudio del *System Architecture Evolution* (SAE).

El estudio de la arquitectura del sistema evoluciónado, se centró en como el núcleo de red 3GPP evolucionará en el próximo núcleo de red de las próximas décadas. El actual núcleo de red fue diseñado en los años 80 para GSM, ampliado durante la década de los años 90, para GPRS y WCDMA.

El funcionamiento de una red a nivel general es bastante sencillo. Las estaciones base se disponen creando una gran malla con forma de célula o celda, conectando mediante ondas de radio dos terminales con los controladores de dichas estaciones base (ver Figura 1.9). Esta disposición en forma de panal no es algo casual, sino que responde a un esquema que permite la reutilización de un determinado conjunto de frecuencias asignadas en distintas celdas, siempre que estas no sean adyacentes, aumentando el rendimiento de la red por un lado (el número de frecuencias que se dispone es limitado) y economizado por otro.

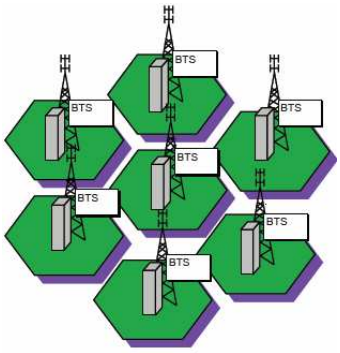

Figura 1.09 *Disposición de las celdas.*

Una red se constituye básicamente en torno a dos tipos de elementos y una adecuada combinación de estos, posibilitando la comunicación tanto entre teléfonos móviles, como entre un teléfono móvil y un teléfono fijo. Estos elementos son:

- Estación base: que son las encargadas de transmitir y recibir la señal.
- Centrales de conmutación: son las que permiten la conexión entre dos terminales concretos.

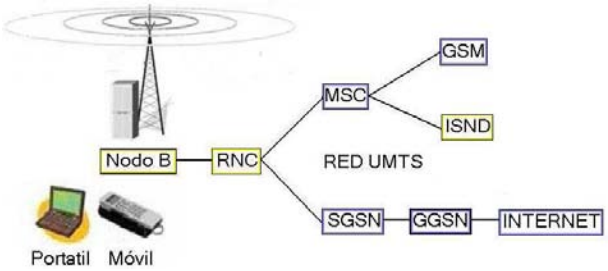

Figura 1.10 *Arquitectura 3G.*

En la Figura 1.10 se muestra la arquitectura 3G, en donde los datos llegan al nodo B (estación base) que es el encargado de recopilar las señales mandadas por los terminales, pasando éstas al RNC o Controlador de la Red de Radio para ser procesadas. El conjunto de los nodos y el RNC constituyen una estructura denominada Red de Acceso de Radio (RAN), la cual conecta los terminales con el Núcleo de Red o *Core Network*, desde el cual se distribuyen los datos por los distintos sistemas mediante una serie de conmutaciones. Según sea su destino, deberán pasar por el MSC (*Mobile Services Switching Center*) o por el SGSN (*Serving GPRS Support Node*) y GGSN (*Gateway GPRS Support Node*).

La filosofía SAE esta enfocada en el dominio de conmutación de paquetes y en emigrar fuera del dominio de conmutación de circuitos. Esto se hace a través de los próximos "*Releases 3GPP*", para así llegar a la evolución del núcleo de red de paquetes, *Evolved Packet Core* el que apoyará tanto a HSPA *Evolution* como a LTE, asegurando que LTE pueda ser desplegado en islas más pequeñas, solo donde sea necesario. Un despliegue con un enfoque gradual puede ser observado en la Figura 1.11.

Figura 1.11 *Estrategia de despliegue HSPA y LTE.*

En primer lugar, el operador puede actualizar su red HSPA a una red con capacidad *HSPA Evolution* y a continuación, añadir las celdas LTE donde carece de capacidad o cuando el operador quiera probar los nuevos servicios que no pueden ser suministrados por HSPA *Evolution*. Este enfoque reduce los costos desde el despliegue de LTE, ya que no es necesario construir más, porque se tiene cobertura nacional desde un principio.

CAPÍTULO II
TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS Y LTE

El presente capítulo da a conocer las evoluciones de las distintas de tecnologías móviles y se realiza una comparación de aspectos técnicos y comerciales entre las tecnologías semejantes. Centrándose básicamente en la competencia de LTE, como lo son WiMAX Móvil y UMB.

2.1 Antecedentes.

La IMT 2000 posee un grupo de interfaces radioeléctricas con el objetivo de evolucionar 3G, en donde se destacan TDMA, CDMA y OFDMA. Cada uno de estos grupos trabaja con sus propias técnicas para mejorar su anterior servicio. Todo esto esta estandarizado por los organismos de especificación 3GPP y 3GPP2. Además el IEEE también se ha manifestado dentro del servicio móvil, evolucionando sus redes inalámbricas a través del comité IEEE 802. Según las diferentes interfaces radio podemos agrupar las tecnologías móviles como se ve en la Tabla 2.1.

Interfaz radio	Tecnologías	Comentario
TDMA	GSM, GPRS, EDGE, TIA/EIA-136 TDMA	Primer aspecto digital celular. Gran éxito en la telefonía GSM. Nuevas mejoras para el diseño de GSM/EDGE.
CDMA	CDMA2000 1xRTT, CDMA2000 EV-DO, WCDMA, HSPA, HSPA+, IEEE 802.11b	Base para casi todas las nuevas redes 3G. Maduro, eficiente, dominando la amplia área de sistemas inalámbricos para el resto de esta década.
OFDM / OFDMA	IEEE 802.16/WiMAX, 3GPP **LTE**, IEEE 802.11a/g/n, IEEE 802.20, 3GPP2 UMB	Eficiencia para sistemas de emisión, mayor ancho de banda y alta velocidad de transmisión de datos. También ofrece flexibilidad en la cantidad de espectro utilizado. Muy adecuado para sistemas previsto para la próxima década.

Tabla 2.1 *Diferentes Aspectos Inalámbricos.*

2.2 Tecnologías Inalámbricas.

2.2.1 Tecnologías 3GPP.

Dando énfasis al aspecto inalámbrico, el 3GPP ha evolucionado un plan para reconocer las fortalezas y debilidades de cada tecnología, con el fin de explotar las únicas capacidades que poseen. Todo empieza con el amplio desarrollo que obtiene globalmente GSM, el cual es una tecnología 2G basada en TDMA, que es el principal paso hacia la evolución en tecnologías 3G. Hoy en día GSM es muy eficiente, sin embargo, hay oportunidades para optimizaciones y mejoras adicionales al sistema. La mayoría de las redes GSM están respaldadas por EDGE (*Enhacer Data rates for GSM of Evolution* o Tasa de datos Mejoradas para la evolución de GSM) que se trata de una mejora de GPRS, que es el original servicio de paquetes de datos para redes GSM. Los organismos de estandarización ya se han definido por "*Evolved* EDGE" o "EDGE Evolucionado", que esta siendo desarrollado actualmente y con el objetivo de duplicar el rendimiento de los sistemas actuales de EDGE. Al final de esta década, debido a la enorme dinámica del mercado, la mayoría de los usuarios en el mundo seguirán siendo abonados utilizando tecnologías GSM/EDGE.

Mientras tanto, CDMA fue elegido como la base de las tecnologías 3G, incluyendo WCDMA para FDD y TDD de UMTS. La evolución de los sistemas de datos para WCDMA, tales como HSPA y HSPA+, introduce mejoras y simplificaciones que ayudan a los sistemas basados en CDMA a coincidir con las capacidades de los sistemas de la competencia, especialmente en el espectro asignado.

Dadas algunas de las ventajas de la interfaz OFDM, el 3GPP ha especificado a OFDMA como base de su tecnología LTE, ya que incorpora las mejores técnicas de radio para lograr niveles de rendimientos más allá de lo que se practica con CDMA. Sin embargo, de la misma manera que 3G coexiste con la segunda generación en los sistemas integrados de redes, los sistemas LTE coexistirán con sistemas 3G y 2G. Dispositivos múltimodo funcionarán a través de LTE/3G o incluso por medio de LTE/3G/2G, dependiendo de las circunstancias del mercado. Más allá de la tecnología de radio, la nueva arquitectura de red *Evolved Packet Core* (EPC)

ofrece un nuevo núcleo que permite al mismo tiempo favorecer las arquitecturas y la integración de LTE con ambas redes GSM/WCDMA, así como otras tecnologías inalámbricas. En la Tabla 2.2 se presenta a continuación, un rápido resumen de las distintas tecnologías destinado a proporcionar un marco referencial para su posterior análisis.

Tecnología	Tipo	Características	Downlink (típico)	Uplink (típico)
GSM	TDMA	Tecnología celular mundialmente desarrollada. Proporciona voz y servicio de datos vía GPRS/EDGE.		
EDGE	TDMA	Servicio de datos para redes GSM. Mejora de datos de GSM por medio de GPRS.	70 Kbps a 130 Kbps	70 Kbps a 130 Kbps
Evolved EDGE	TDMA	Versión mejora de EDGE que puede duplicar eventualmente las tasas de rendimiento.	150 a 500 Kbps esperado	100 a 500 Kbps esperado
UMTS WCDMA	CDMA	Tecnología 3G que proporciona voz y datos. Su actual despliegue aplica HSPA para el servicio de datos.	200 a 300 Kbps	200 a 300 Kbps
HSPA	CDMA	Servicios de datos de redes UMTS. Mejora en los servicios originales de UMTS.	1 a 4 Mbps	500 Kbps a 2 Mbps
HSPA+	CDMA	Evolución de HSPA. Aumento del rendimiento y capacidad, reduciendo la latencia.	>5 Mbps esperado	>3 Mbps esperado
LTE	OFDMA	Nueva tecnología que puede utilizar canales de radio a escala y entregar tasas muy altas de rendimiento. Maneja todas las comunicaciones con dominio IP.	>10 Mbps esperado	>5 Mbps esperado
LTE Advanced	OFDMA	Versión avanzada de LTE diseñada para satisfacer requisitos de las IMT*Advanced*.		

Tabla 2.2 *Características de las tecnologías 3GPP.*

Las expectativas a lo largo del tiempo de las redes EDGE/HSPA/LTE con respecto a sus disponibles características y capacidades, se especifican a continuación indicando el año inicial de su desarrollo:

2009: - Las redes y los dispositivos estarán aptos para el Release 7 HSPA+, incluyendo MIMO, impulsando así las velocidades máximas de HSPA a los 28 Mbps.
- Mejorarán los servicios basados en IMS (IP Multimedia Subsystem), por ejemplo, vos integrada, multimedia, ubicación y presencia.

2010: - Las capacidades disponibles de la tecnología *Evolved* EDGE, incrementarán de forma significativa las tasas de rendimiento de EDGE.
- Las velocidades *peak* de HSPA+ aumentarán aún más, hasta un *peak* de 42 Mbps. LTE introducirá a la nueva generación en rendimiento, el desempeño del uso de 2x2 MIMO.
- Avanzadas arquitecturas estarán disponibles a través de EPC/SAE, principalmente para LTE como también para HSPA+, aportando beneficios tales como la integración de múltiples tipos de red y arquitecturas planas para un mejor rendimiento de la latencia.
- La mayoría de los nuevos servicios implementarán dominio de paquetes sobre HSPA+ y LTE.

2011: - LTE tendrá mejoras tales como 4x2 MIMO y 4x4 MIMO y las especificaciones estarán concluidas para *Advanced* LTE.

2012: - *Advanced* LTE será potencialmente desplegada en las etapas iniciales.

Con el tiempo los elementos de infraestructura básica se someterán a la consolidación, por lo tanto, la reducción del costo total de la red y las mejoras de las operaciones integradas de las redes de acceso. En la actualidad, para los usuarios con dispositivos múlti-modo, las redes de acceso serán en gran parte transparentes.

En la Figura 2.1 se presentan los avances en HSPA y LTE, trazados en el tiempo, mostrando una duplicación del rendimiento aproximado por año.

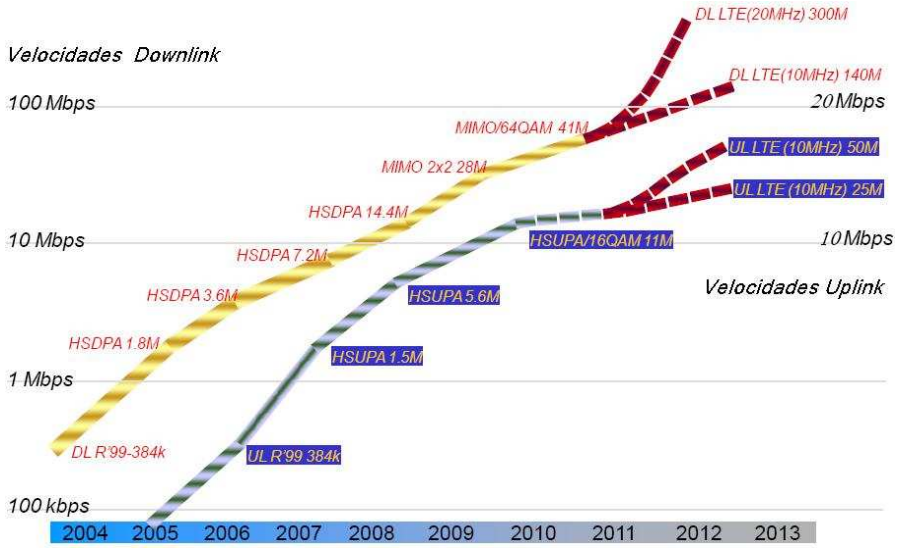

Figura 2.1 *Rendimientos peak para el enlace ascendente y descendente [13].*

A pesar del rápido despliegue de WCDMA de UMTS, la mayoría de los abonados en el mundo seguirá utilizando GSM al final de esta década, entonces la mayoría de los nuevos usuarios sacarán ventaja de WCDMA. Del mismo modo se reflejará en la redes LTE ya que probablemente el despliegue será a principios de la próxima década y así a mediados de ella, el porcentaje de abonados a redes LTE seria muy considerable. Durante estos años las redes y los dispositivos tendrían la característica de tri-modo apoyándose en GSM, WCDMA y LTE.

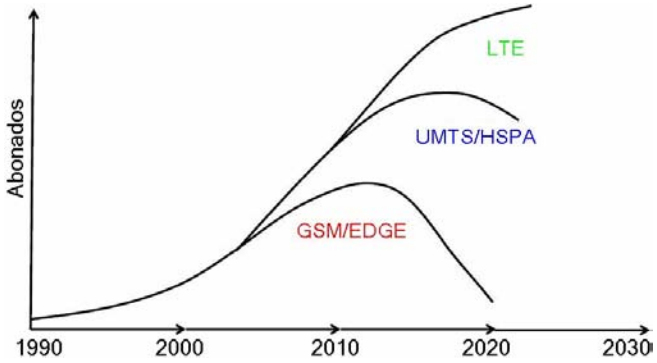

Figura 2.2 *Adopción Tecnológica en décadas.*

La Figura 2.2 muestra la relación que adoptan las tecnologías durante varias décadas y el periodo de tiempo que le toma a cualquier nueva tecnología a desarrollarse ampliamente en el mundo. Las capacidades de datos por tecnología se aprecian en la Tabla 2.3 las cuales se

presentan en términos de tasas de rendimiento *peak* de red y de usuario en condiciones favorables y típicas.

	Downlink		Uplink	
	Peak de Red	**Peak de Usuario**	**Peak de Red**	**Peak de Usuario**
EDGE (type 2MS)	473,6 Kbps		473,6 Kbps	
EDGE (type 1MS)	236,8 Kbps	200 Kbps	236,8 Kbps	200 Kbps
Evolved EDGE (type 1MS)	1184 Kbps		473,6 Kbps	
Evolved EDGE (type 2MS)	1894,4 Kbps		947,2 Kbps	
UMTS wcdma Rel 99	2,048 Mbps		768 Kbps	
UMTS wcdma Rel 99 Terminal Practico	384 Kbps	350 Kbps peak	384 Kbps	350 Kbps peak
HSDPA (2006) Inicios	1,8 Mbps	> 1 Mbps peak	384 Kbps	350 Kbps
HSDPA	14,4 Mbps		384 Kbps	
HSPA Inicial Implementación	7,2 Mbps	> 5 Mbps peak	2 Mbps	> 1,5 Mbps peak
HSPA	14,4 Mbps		5,76 Mbps	
HSPA+DL64QAM, UL 16 QAM	21,6 Mbps		11,5 Mbps	
HSPA+DL16QAM, UL16QAM,2x2MIMO	28 Mbps	> 5 Mbps teórico esperado	11,5 Mbps	> 3 Mbps teórico esperado
HSPA+DL64QAM, UL16QAM,2x2MIMO	42 Mbps		11,5 Mbps	
LTE (2x2 MIMO)	173 Mbps	>10Mbps teórico esperado	58 Mbps	> 5 Mbps teórico esperado
LTE (4x4 MIMO)	326 Mbps		86 Mbps	

Tabla 2.3 *Rendimiento de las diferentes tecnologías 3GPP (el color azul es teórico).*

2.2.1 Tecnologías Competidoras.

Aunque tecnologías como GSM, GPRS, EDGE y UMTS dominan las redes mundiales desarrolladas en tecnología celular, los operadores desplegarán otras tecnologías inalámbricas para servir a su vez a una red de área metropolitana como a una red de área local. Así es el caso de las tecnologías CDMA2000 del 3GPP2 y de WiMAX.

CDMA2000, consiste principalmente en una portadora, como 1xRTT (*Radio Transmission Technology*) y 1xEV-DO (*Evolved Data Optimized*). Es la otra gran tecnología celular desplegada en muchas partes de mundo. 1xRTT es actualmente la versión ampliamente más implementada de CDMA2000. Una serie de operadores han implementado o están desarrollando 1xEV-DO, cuando una radio portadora se dedica a las altas velocidades de funciones de datos. En julio del año 2008 hubo 100 redes de acceso EV-DO *Release* 0 y 42 redes EV-DO Rev A desplegados mundialmente.

EV-DO emplea muchas de las técnicas que utiliza HSPA para optimizar la eficiencia espectral, incluyendo la modulación de orden superior, la eficiente programación, y la modulación y codificación adaptativa. Por estas razones, se logra la eficiencia espectral que es prácticamente el mismo que el que posee HSPA. Las tecnologías 1x operan en la frecuencia de 1,25 MHz, en comparación con la frecuencia de 5 MHz que es usado por WCDMA. Estos resultados dan un *peak* de redimiendo teóricamente bajo, pero el procesamiento promedio para el alto nivel de carga de red, es similar. Bajo las condiciones de media carga, debido a la menor velocidad de transmisión de datos alcanzable, EV-DO Rev A logra un rendimiento típico, ligeramente inferior en comparación con HSPA. Los operadores han dado a conocer el rendimiento típico del enlace ascendente para EV-DO Rev 0 que va desde los 400 a 700 Kbps y entre 600 Kbps a 1,4 Mbps para EV-DO Rev A.

Actualmente las redes desplegadas se basan en cualquiera de las especificaciones de la interfaz radio, Rev 0 o Rev A. En el año 2007 los operadores hicieron de EV-DO Rev A una tecnología disponible comercialmente.

Uno de los desafíos para los operadores de EV-DO, es que no pueden asignar dinámicamente la totalidad de los recursos espectrales entre las funciones de voz y datos de alta velocidad. El canal de EV-DO no está disponible para el circuito de conmutación de voz, y la oferta de canales 1xRTT sólo es para datos de mediana velocidad. El uso de datos actualmente se ha expandido, lo cual esta limitación no favorece la optimización de los recursos de radio. Otra limitación es utilizar un canal separado para servicios de datos EV-DO, esto actualmente impide a los usuarios operar de forma simultánea en servicios de voz y de datos de alta velocidad, mientras que esto si es posible con la tecnología UMTS. Muchos usuarios disfrutan teniendo una conexión de datos atada al ordenador portátil, ellos usan *Bluetooth* por ejemplo, y pueden iniciar y recibir llamadas telefónicas, manteniendo al mismo tiempo sus sesiones de datos.

EV-DO eventualmente ofrece un servicio de voz utilizando los protocolos de VoIP a través de EV-DO Rev A, que incluye una mayor velocidad en el enlace ascendente, optimizando los mecanismos de QoS en la red y los protocolos para reducir la cabecera del paquete, así como hacer frente a problemas tales como, la variación en cuanto a la cantidad de latencia entre paquetes de datos que se reciben.

Más allá del EV-DO Rev A, el 3GPP2 ha definido el EV-DO Rev B que permite la combinación de hasta 15 canales de radio o portadoras de 1,25 MHz en 20 MHz, alcanzando un máximo aumento de *peak* teórico de 73,5 Mbps.

Después del EV-DO Rev B nos encontramos con UMB (*Ultra Mobile Broadband*), que esta basado en OFDMA tal como LTE. UMB soporta canales de radio desde 1.25 a 20 MHz. En una portadora de 20 MHz, con 4x4 MIMO, UMB ofrece una velocidad *peak* de datos de 280 Mbps, ver Tabla 2.4. Hay operadores que aún no se han comprometido con UMB, ya que existen preguntas sobre la viabilidad comercial de los operadores CDMA2000, tal como ha ocurrido con el operador Verizon que ha seleccionado a LTE como la tecnología de próxima elección.

UMB y LTE se desarrollan simultáneamente, además son tecnologías OFDMA más recientes que otras, como es el caso de WiMAX.

	Downlink		Uplink	
	Peak de Red	**Peak de Usuario**	**Peak de Red**	**Peak de Usuario**
CDMA2000 1xRTT	153 Kbps	130 Kbps peak	153 Kbps	130 Kbps peak
CDMA2000 EV-DO Rev 0	2,4 Mbps	> 1 Mbps peak	153 Kbps	150 Kbps peak
CDMA2000 EV-DO Rev A	3,1 Mbps	> 1.5 Mbps peak	1,8 Mbps	> 1 Mbps peak
CDMA2000 EV-DO Rev B (3 portadoras)	9,3 Mbps		5,4 Mbps	
CDMA2000 EV-DO Rev B (15 portadoras)	73,5 Mbps		27 Mbps	
UMB (2x2 MIMO)	140 Mbps		34 Mbps	
UMB (4x4 MIMO)	280 Mbps		68 Mbps	

Tabla 2.4 *Rendimiento de las tecnologías 3GPP2.*

WiMAX, se ha convertido en una potencial alternativa en la tecnología celular, para una amplia zona de redes inalámbricas. Se basa en OFDMA y recientemente aceptado por la UIT bajo el nombre de OFDMA TDD WMAN. Posee un gran arrastre en los países desarrollados que desean desplegar sus redes utilizando la alternativa por cable. El protocolo que caracteriza esta tecnología es la especificación IEEE 802.16, que cual fue completada en el año 2001 y está destinada principalmente a aplicaciones de telecomunicaciones *backhaul* punto a punto y configuraciones de línea de vista utilizando el espectro sobre los 10 GHz.

El siguiente gran paso en la evolución de IEEE 802.16 se produjo en el año 2004, con la versión del estándar IEEE 802.16-2004. Éste agregó múltiples interfaces radio, incluyendo OFDM-256 y OFDMA. Al igual que la versión del estándar original, la operación es fija, es decir, las estaciones de los abonados son típicamente inmóviles. Las potenciales aplicaciones incluyen servicios inalámbricos como, Proveedor de Servicios de Internet (ISP), telefonía local (como alternativa a módem por cable o servicio DSL) y *backhaul* celular para conexiones desde la estación base hasta las infraestructuras de las redes del operador.

Los proveedores están entregando equipos certificados con el estándar IEEE 802.16-2004. Este estándar no compite directamente con los datos celulares y redes privadas Wi-Fi, por lo tanto puede proporcionar servicios complementarios. Además las soluciones de acceso, el operador *host*, las entidades privadas como gobiernos municipales, universidades y empresas podrán utilizar esta versión WiMAX en las bandas no licenciadas para la conectividad local.

El IEEE también ha completado un estándar de banda ancha móvil llamado IEEE 802.16e-2005, que añade capacidades de movilidad incluyendo el apoyo mientras la operación es móvil, *handover* a través de las estaciones base y a través de los operadores. A diferencia del IEEE 802.16-2004, que opera en ambas bandas con licencia y sin licencia, el IEEE 802.16e-2005 (WiMAX Móvil) opera en la mayoría de las bandas con licencia. Las redes de WiMAX Móvil no son compatibles con las redes del estándar anterior IEEE 802.16-2004.

En un comienzo WiMAX Móvil utilizará 2x2 MIMO, TDD y canales de radio de 10 MHz en un perfil definido por WiMAX Forum conocido como WiMAX Wave 2. Más allá de Wave 2, los proveedores de WiMAX están definiendo un nuevo estándar llamado WiMAX Release 1.5, que incluye varias mejoras para la obtención de mayor eficiencia y rendimiento, y estará disponible al mismo tiempo que LTE. La versión posterior, WiMAX Móvil 2.0, esta siendo diseñada para abordar los requisitos de rendimiento desarrollado por el proyecto de las IMT-Advanced, y se llama IEEE 802.16m, éste funcionará con el usuario en movimiento hasta 120Km/h y estará disponible en el año 2011, por lo que sus datos aún no se conocen.

	Downlink		**Uplink**	
	Peak de Red	**Peak de Usuario**	**Peak de Red**	**Peak de Usuario**
802.16e WiMAX Wave 1 (1x2 MIMO)	23 Mbps		4 Mbps	
802.16e WiMAX Wave 2 (2x2 MIMO)	46 Mbps		4 Mbps	
802.16m	-		-	

Tabla 2.5 *Rendimiento de la tecnología WiMAX.*

Cabe señalar, que el IEEE 802.16e-2005 contiene algunos aspectos que pueden limitar el rendimiento, especialmente en situaciones en las que un sector contiene un gran número de usuarios móviles. El desempeño de la capa MAC es ineficiente frente a la programación del gran número de usuarios y, en algunos aspectos como el control de la potencia de la estación móvil, se utilizan mensajes de señalización MAC más que el rápido control de potencia utilizados en WCDMA y otras tecnologías.

En relación con LTE, WiMAX tiene las siguientes desventajas; trama de 5 ms en vez de 1 ms, persigue la combinación en vez de incrementar la redundancia, presenta imperfecciones de modulación y codificación en los sistemas, y posee codificación vertical en vez de codificación horizontal [10]. Una consideración en el desarrollo son los requerimientos TDD en redes de sincronización. Esto no es posible en una celda situada para transmitir y una celda adyacente situada para recibir al mismo tiempo. Distintos operadores en la misma banda deben coordinar cualquiera de sus redes o bandas de guardia, para asegurarse de que no interfieran unos con otros.

En referencia a las economías de escala, el número de los abonados GSM/WCDMA/HSPA se aproxima a los miles de millones, lo cual en comparación con el número de abonados de WiMAX es bastante alta, ya que estos ni en los próximos 5 años podrían llegar a un número tal.

Desde el punto de vista de tecnología, WiMAX Móvil ocupa un papel ligeramente más capacitado hoy en día en comparación con las versiones HSPA. WiMAX Móvil en realidad tiene que competir contra HSPA desarrollando sistemas que ofrezcan capacidades similares a un rendimiento mejorado. Con esto, más adelante, LTE no estará lejos de desarrollarse.

2.3 Comparación de Tecnologías Inalámbricas.

Las tecnologías están en una evolución constante, ya que el mercado en que se encuentran se mueve a una velocidad increíble. El alto nivel de competencia que se genera, provoca la tendencia de evolucionar más allá de la voz y ofrecer acceso personal a la telefonía, Internet y servicios multimedia a costos accesibles tanto en áreas urbanas como suburbanas y rurales. El incremento de estas diferentes tecnologías inalámbricas se puede observar en la Figura 2.3, en conjunto con el rendimiento máximo de las capacidades de cada red.

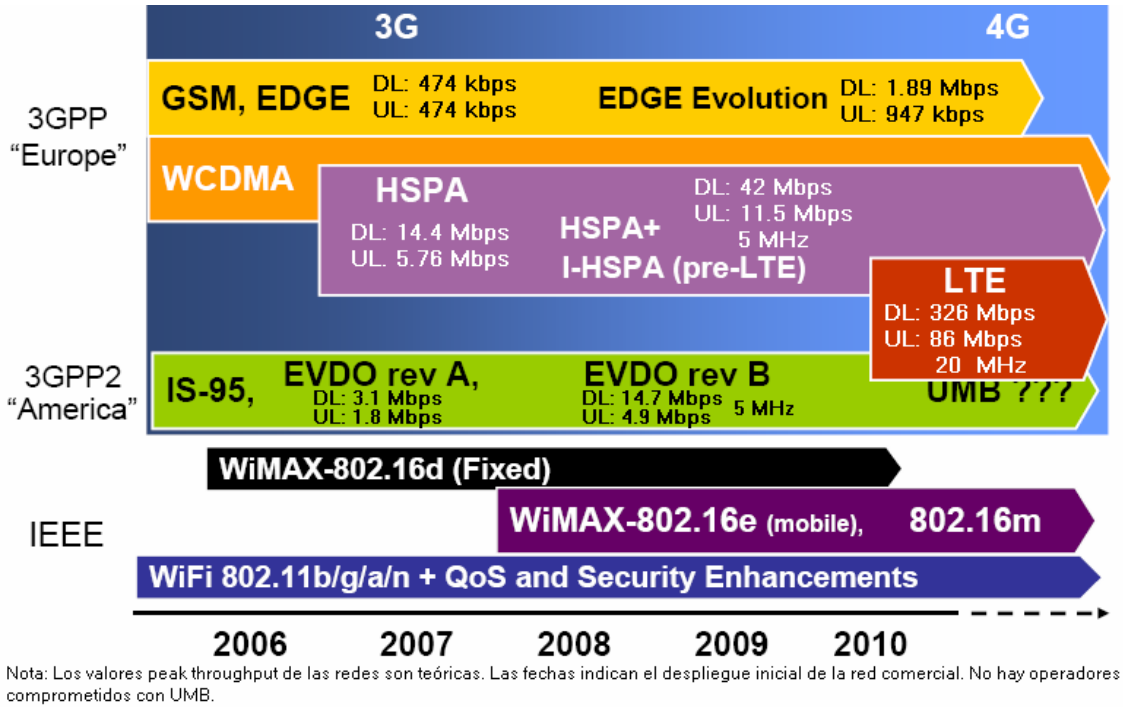

Figura 2.3 *Evolución de los sistemas TDMA, CDMA y OFDMA.*

El valor *peak throughput* es un indicador muy importante al momento de cuantificar las capacidades de datos que posee cada red. Por lo general se basa en el valor de nivel más alto de modulación disponible y la menor cantidad de codificación (corrección de errores) por sobre la red.

Otros datos indicadores importantes en la evolución de los sistemas móviles son: latencia, eficiencia espectral, calidad de servicio, servicio de voz y posición en el mercado.

2.3.1 Latencia.

La latencia se define como el tiempo de ida y vuelta que toman los datos en recorrer la red. Cada tecnología de datos posterior a EDGE Rel'99 posee menos latencia, en redes HSDPA, por ejemplo, la latencia es de unos 70 milisegundos (ms). HSPA tiene latencia aún más baja, así como también en el caso de LTE 3GPP. Los valores mostrados en la Figura 2.4 reflejan las mediciones del despliegue comercial de las tecnologías.

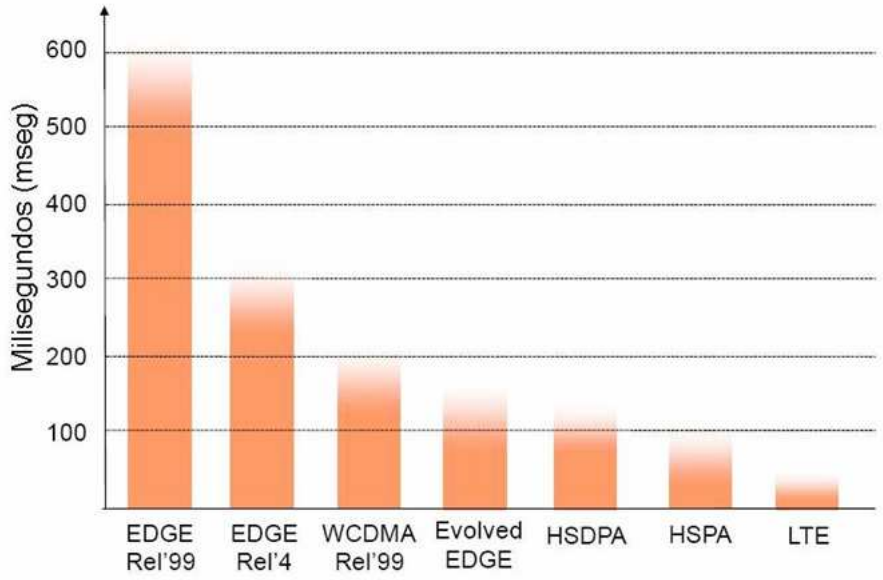

Figura 2.4 *Latencia de las diferentes tecnologías 3GPP.*

2.3.2 Eficiencia Espectral.

La eficiencia espectral mide que tan bien es aprovechado el espectro por una red inalámbrica, es útil de examinar para poder mejorar la capacidad, aumentar la fuerza de la señal y reducir la interferencia.

La evolución de los servicios de datos se caracteriza por un creciente número de usuarios, que cada vez ejercen una mayor demanda de banda ancha. Como el mercado crece, el despliegue de las tecnologías inalámbricas con alta eficiencia espectral es de vital importancia, por lo que se debe tener en cuenta; bandas de frecuencias, cantidad de espectro y la separación de los sectores

de celdas. Un aumento de la eficiencia espectral se traduce en un aumento proporcional en el número de usuarios o un aumento de capacidad disponible para cada usuario. Además este aumento implica un precio, por lo general una mayor complejidad para los usuarios y los equipos de estaciones base.

La fecha exacta para el despliegue de una mayor eficiencia espectral en las tecnologías es difícil de predecir, porque dependerá mucho del crecimiento del mercado y de los tipos de aplicaciones que se vuelvan más populares. Hay tecnologías por ejemplo, que mejorando el sistema SRN reducen al mínimo la interferencia que se genera al ocupar antenas inteligentes, o la interferencia de coordinación entre sectores y celdas. Además las técnicas MIMO usando Múltiplexación Espacial, han potenciado el aumento de la tasa de transferencia de información por un factor proporcional al número de transmisión.

La Figura 2.5 compara la eficiencia espectral de las diferentes tecnologías inalámbricas basadas en un acuerdo del 3G Américas, el que muestra la continua evolución de las capacidades tecnológicas [34].

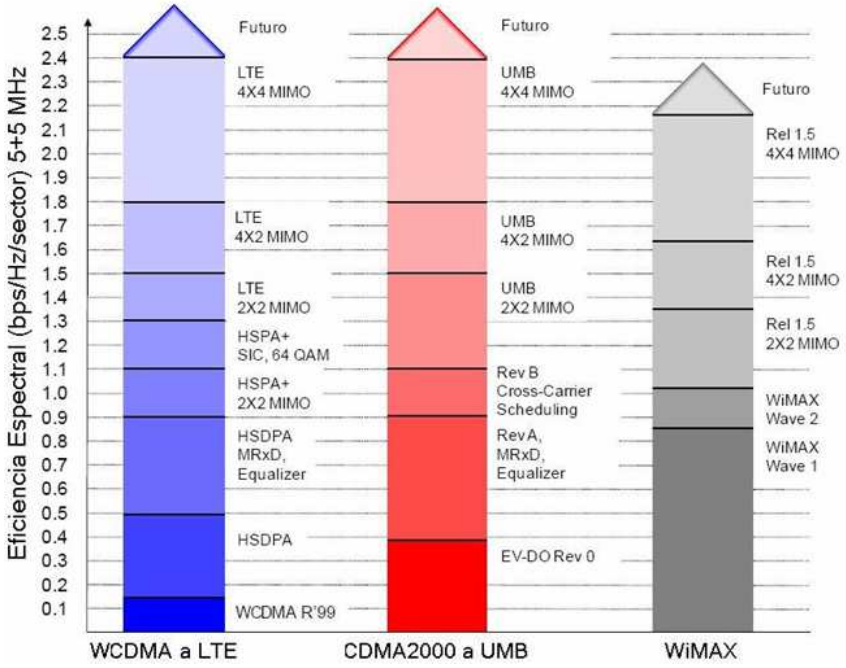

Figura 2.5 *Comparación de Eficiencia espectral Downlink.*

Los valores mostrados son conservadores, en propósito de la representación razonable para las condiciones del mundo real, en el que no están todas las combinaciones de características disponibles, sin embargo, también son datos representativos en la mejora continua de la eficiencia espectral.

Con respecto al efectivo despliegue, las mejoras tales como 64QAM, son más fáciles de desarrollar para los operadores que otras como MIMO 2x2, ya que en el primero se puede realizar una actualización del software, mientras que en el segundo se requiere de implementación de hardware en la estación base. Así, la Figura 2.5 no muestra necesariamente el actual progreso desplegado por los operadores para aumentar la eficiencia espectral.

Un punto importante a destacar, es que LTE es más eficiente espectralmente que otras tecnologías, como WiMAX Wave 2. La causa de esto se daría por una serie de razones, por ejemplo; incremento de la redundancia en la corrección de errores, modulación con fina granularidad y codificación de sistemas, mayor eficiencia de control del canal, múltiple *codeword* MIMO (MCW) que permiten el uso de receptores basados en la técnica de cancelación de interferencias sucesiva SIC (*Successive Interference Cancellation*), y un inferior indicador de calidad del canal retrasado a través del uso de las tramas.

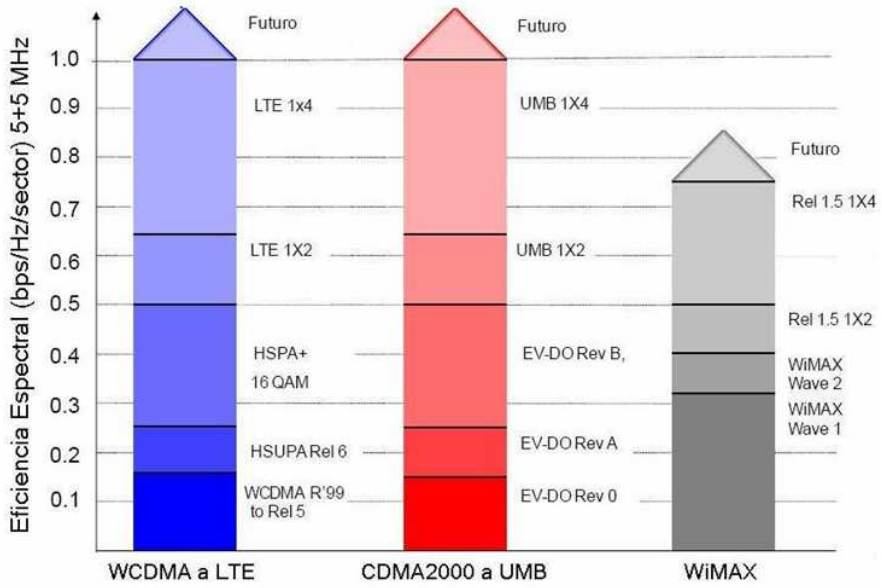

Figura 2.6 *Comparación de Eficiencia espectral Uplink.*

La Figura 2.6 compara la eficiencia espectral del enlace ascendente de los diferentes sistemas y se aprecia que la eficiencia espectral del enlace ascendente de WiMAX Wave 2, es inferior a las tecnologías 3GPP y 3GPP2 que emplean la cancelación de interferencia.

La Figura 2.7 compara la eficiencia espectral de la voz. Se muestra también la codificación de voz de UMTS R'99 con AMR (*Adaptive Multi-Rate*) ambos valores, 12,2 Kbps y 7,95 Kbps. El AMR de 12,2 Kbps ofrece una calidad de voz en buenas condiciones del canal. WCDMA ha tenido una dinámica adaptación entre las tasas de codificación de voz, lo que permite una mayor calidad de voz en comparación con el aumento de tasa variable (EVRC), en situaciones donde la capacidad es limitada.

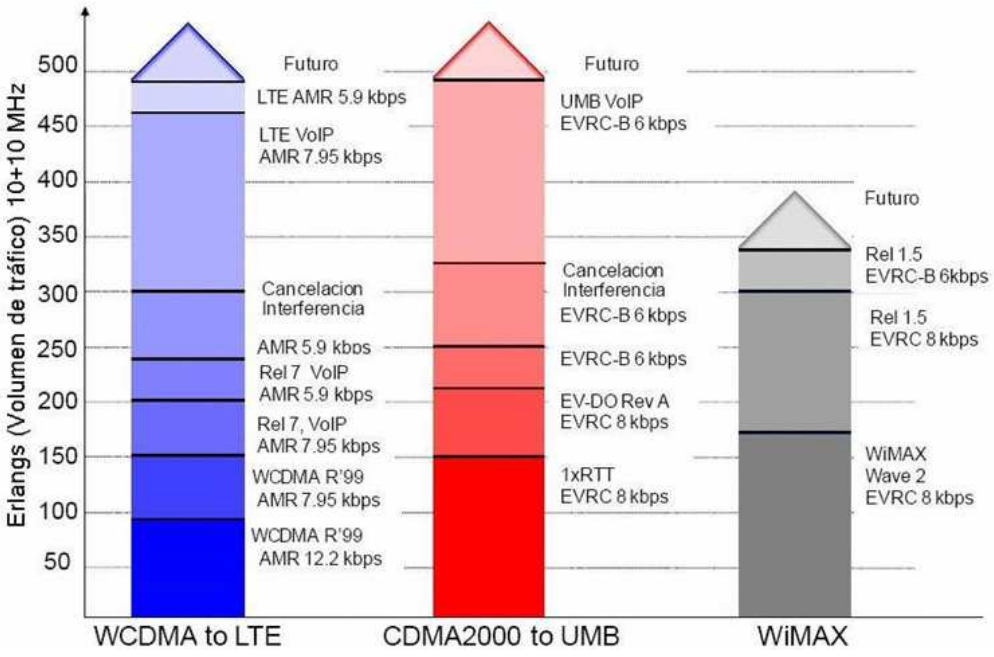

Figura 2.7 *Comparación de la capacidad de Voz.*

Las oportunidades para mejorar la capacidad de voz, se proponen utilizando VoIP sobre los canales HSPA. Dependiendo de las mejoras aplicadas, podría duplicar la capacidad de voz sobre los sistemas de conmutación de circuitos. Cabe señalar, que las ganancias no son relacionadas específicamente con el uso de VoIP, sino que se refieren a los avances de las técnicas de radio aplicadas en los canales de datos. Muchos de estos mismos avances también

pueden ser aplicados a los actuales modos de conmutación de circuitos. Sin embargo, hay otros beneficios de la VoIP que están impulsando hacia la migración de paquetes de datos. Entre estas prestaciones se consolidó un núcleo de red IP para los operadores y aplicaciones multimedia sofisticadas para los usuarios.

Con respecto a los *códecs* en los sistemas VoIP, tales como LTE, UMB y WiMAX, una gran variedad se pueden utilizar. Las cifras muestran un supuesto rendimiento específico de los *códecs,* representando la velocidad de bits por códecs como EVRC. La tasa de bits que se muestra es un valor medio.

Aunque WiMAX Release 1.5 tiene una alta eficiencia espectral para VoIP en el enlace ascendente y descendente, esto tiene una desventaja en relación con LTE, debido a la diferencia de los milisegundos soportados. El uso de los 5 ms limita el número de retransmisiones HARQ (*Hybrid Automatic Repeat-reQuest*) en cada trama de 20 ms. LTE puede soporta múltiples retransmisiones de este tipo en los 20 ms de intervención, en cambio WiMAX solo admite una.

2.4 Costos y Volumen de mercado.

Muchas de las comparaciones se han realizado en base a la capacidad técnica de las diferentes tecnologías, las cuales han demostrado hasta ahora que poseen similares atributos. Sin embargo, hay un punto de comparación en el que las diferencias entre las tecnologías difieren enormemente, esto se refiere al número de agentes implicados, incluyendo los abonados y el importe de la infraestructura necesaria. Esta diferencia se debe traducir a un drástico costo reducido para un mayor número de soluciones.

Basado en las proyecciones y los números estadísticos [13], los abonados de redes 3G UMTS a finales de esta década serían cientos de millones aproximadamente (ver Figura 2.8), mientras que el número de abonados a nuevas tecnologías como IEEE 802.16e-2005 llegaría a las decenas de millones, además para este último se señalan menores costos para sus servicios.

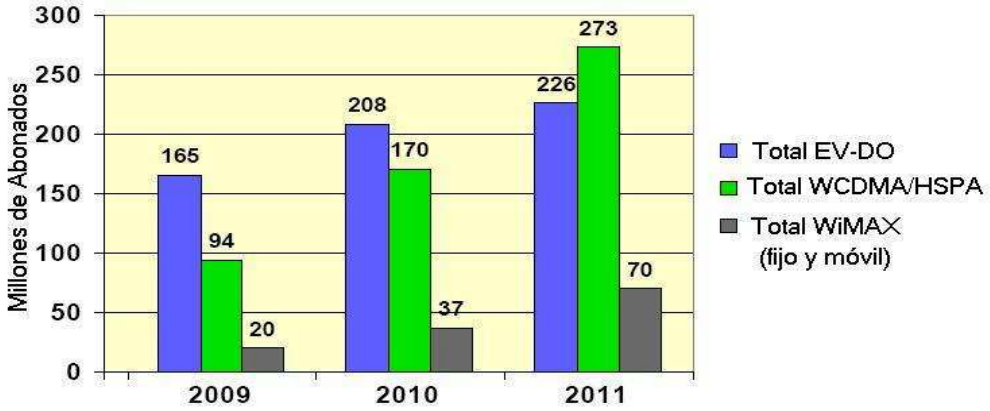

Figura 2.8 *Abonados EV-DO, WCDMA/HSPA y WiMAX.*

Desde el punto de vista del despliegue, el tipo de tecnología utilizada (por ejemplo, HSPA frente a WiMAX) sólo se le aplica un software de apoyo en la tarjeta digital de la base estación. Este costo, sin embargo, es sólo una pequeña fracción del costo de la estación base con el equilibrio que abarcan antenas, amplificadores de potencia, cables, bastidores, y tarjetas de radiofrecuencia. En cuanto al resto de la red incluyendo la construcción, *backhaul*, componentes del núcleo de red, los costos son similares independiente de la tecnología de red de acceso radio. El costo del espectro en cada tecnología puede variar mucho, dependiendo de los reglamentos de un país y la banda de espectro. Como regla general en la mayor parte del mundo la venta de un espectro, por ejemplo de la banda de los 3,5 GHz costará menos que la de 850 MHz.

En cuanto a redes WCDMA/HSPA frente a CDMA2000, el mayor despliegue podría traducirse en un ahorro significativo de costos. También, los teléfonos GSM se consideran mucho menos caros que los teléfonos 1xRTT y las terminales WCDMA, con precios mayoristas que pueden ser líderes en el mercado de bajo costo.

LTE aún está en el camino hacia un sólido ecosistema inalámbrico de importantes economías a escala. En junio del año 2008, la alianza *Next Generation Mobile Network* (NGMN) confirmó la selección de LTE. El Dr. Meter Meissner, funcionario operativo de NGMN anuncio que, *"sobre la base de intensas y detalladas evaluaciones de la tecnología, LTE 3GPP es la primera que cumple ampliamente sus recomendaciones y es aprobado por esta junta directiva"* [31].

CAPÍTULO III
TÉCNICAS DE ACCESO AL MEDIO

En este capítulo se describen las técnicas que utiliza LTE para el control de acceso al medio, explicando principalmente como trabaja el enlace ascendente y el enlace descendente de acuerdo a los tipos de interfaz de aire que ocupa LTE. Además se sigue con una visión técnica de los distintos sistemas con que se obtienen mejores rendimientos en la transmisión de los datos.

3.1 Sistemas de Transmisión.

3.1.1 OFDM.

OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) ha sido aprobado como el sistema de transmisión de enlace descendente del 3GPP LTE y también se utiliza para otras tecnologías como WiMAX y DVB *broadcast*. La transmisión por medio de OFDM puede ser apreciado como una especie de transmisión multi-portadora. Las características básicas de la transmisión de OFDM son:

- El uso de un número relativamente grande de subportadoras de banda estrecha, es decir, una simple multi-portadora consistirá en pocas subportadoras, cada una con un relativo ancho de banda. Por ejemplo, una multi-portadora WCDMA con 20 MHz de ancho de banda, podría consistir en cuatro subportadoras, cada una con un ancho de banda en el orden de los 5 MHz. En comparación con los otros sistemas, la transmisión OFDM puede implicar que varios cientos de subportadoras se transmiten en el mismo enlace de radio al mismo receptor.

- Posee un simple pulso rectangular en el dominio del tiempo configurado como se ilustra en la Figura 3.1a. Esto corresponde a una forma de función sinc en el dominio de frecuencia, como se ilustra en la Figura 3.1b.

- El compacto dominio de frecuencia de las subportadoras con una desviación *Δf = 1/Tu*, donde *Tu* es el tiempo de la modulación del símbolo por subportadora (véase Figura 3.2).

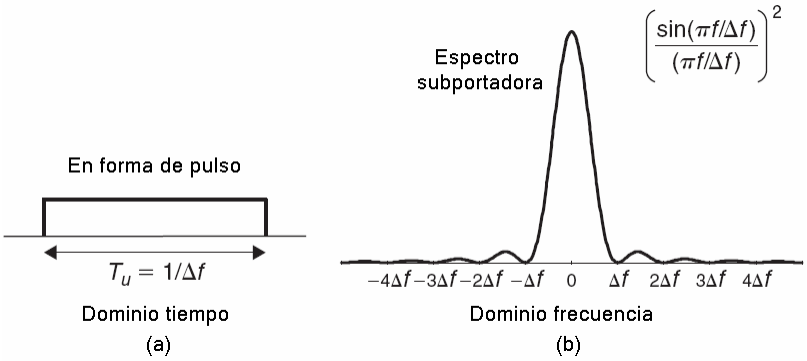

Figura 3.1 *Espectro básico OFDM en dominio de tiempo y frecuencia.*

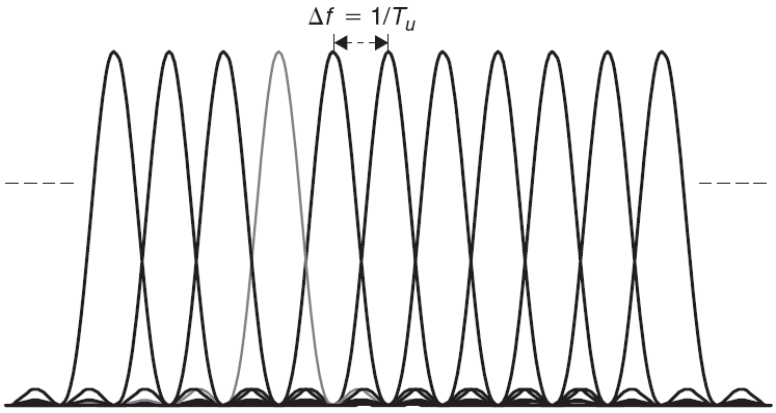

Figura 3.2 *Desviación de portadoras OFDM.*

El número de subportadoras OFDM puede variar desde menos de cien a varios miles, con una desviación de subportadoras que van desde cientos de KHz a unos pocos KHz. La desviación de subportadora a utilizar depende de los tipos de ambientes en el que va a operar el sistema, incluyendo tales aspectos como el máximo esperado de selectividad de frecuencia del radio canal (máximo esperado del tiempo de dispersión) y el máximo de velocidad de transmisión de variación canal (máximo esperado de propagación Doppler).

Como ejemplo, para LTE la básica desviación es igual a 15 KHz. Por otra parte, el número de subportadoras depende del ancho de banda de transmisión, en el orden de 600

subportadoras en caso de operación en un espectro asignado de 10 MHz, y menos o más subportadoras en el caso de los pequeños o grandes anchos de banda de transmisión respectivamente.

Una ilustrativa descripción de un modulador OFDM básico, se presenta en la Figura 3.3. Ello consta de un banco de moduladores *Nc* complejo, donde cada modulador corresponde a una subportadora OFDM. La transmisión esta basada en bloques, implicando que durante cada intervalo de símbolo OFDM, la modulación de los símbolos Nc es transmitida en paralelo. La modulación de símbolos puede ser QPSK, 16QAM o 64QAM.

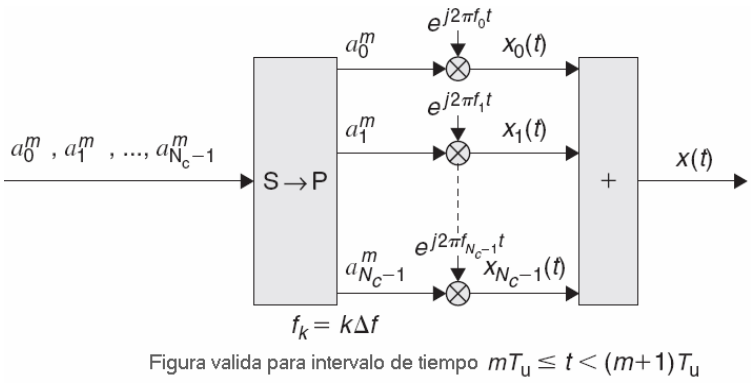

Figura 3.3 *Modulación OFDM.*

El "recurso físico" en el caso de la transmisión OFDM, es a menudo ilustrado como una rejilla (*grid*) de tiempo-frecuencia de acuerdo con la Figura 3.4, donde cada columna corresponde a un símbolo OFDM y cada fila corresponde a una subportadora OFDM.

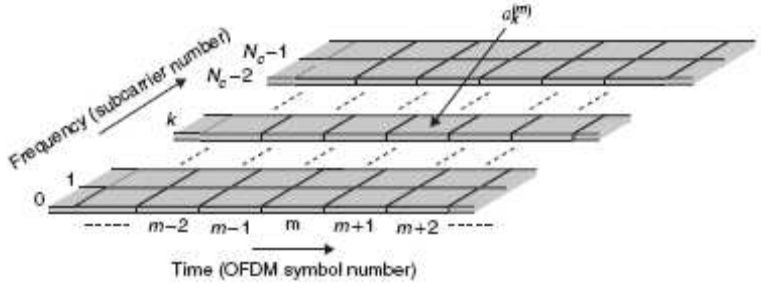

Figura 3.4 *Grid OFDM tiempo-frecuencia.*

Los principios básicos para la demodulación OFDM se muestran en la Figura 3.5, consisten en un banco de correladores, uno para cada subportadora. Teniendo en cuenta la ortogonalidad entre subportadoras, en el caso ideal, dos subportadoras OFDM no causan ninguna interferencia entre sí después de la demodulación, teniendo en cuenta que en el espectro las subportadoras vecinas claramente se solapan, como puede verse en la Figura 3.2.

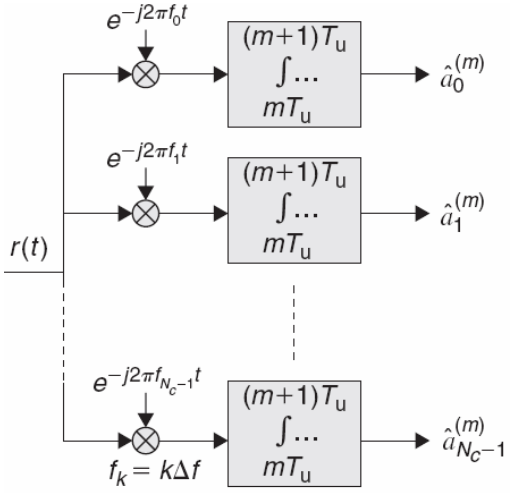

Figura 3.5 *Demodulación OFDM básica.*

La ausencia de interferencias entre subportadoras no se debe a una separación del espectro de una subportadora, por el contrario, la ortogonalidad se debe a la estructura de dominio de frecuencia de cada subportadora en combinación con la elección específica de Δf, sin embargo, con el tipo de transmisión multi-portadora, la corrupción del dominio de frecuencia, como por ejemplo, debido a una frecuencia selectiva del canal de radio, puede dar lugar a una pérdida de ortogonalidad intersubportadora y así una interferencia intersímbolo (ISI). Para manejar esto y hacer una señal verdaderamente sólida, se usa la inserción del prefijo cíclico (intervalo de guarda), como se aprecia en la Figura 3.6, al añadir el prefijo cíclico de $N_{PC} < N$ muestras a la señal de salida del modulador OFDM, se obtiene una señal de longitud $N_S=N+N_{PC}$, por lo que la duración del símbolo aumenta, pero de manera que no se pierde ortogonalidad entre portadoras ya que se copia al inicio una parte de señal de portadoras ortogonales entre ellas.

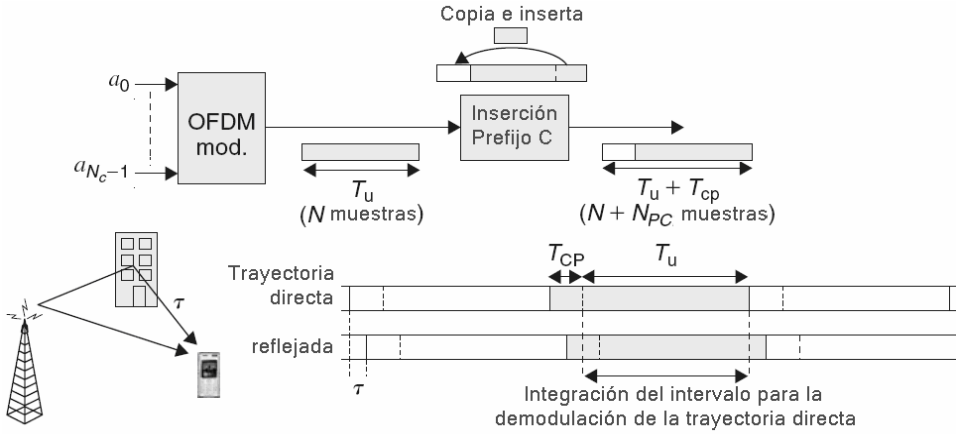

Figura 3.6 *Inserción del Prefijo cíclico.*

Entonces, este sistema de transmisión en el enlace descendente, es atractivo por varias razones. Debido al correspondiente largo de tiempo del símbolo OFDM en combinación con un prefijo cíclico, OFDM proporciona un alto grado de robustez frente al canal selectivo de frecuencia. Aunque hay corrupción de la señal, este puede ser manejado en un principio por medio de la igualación en el lado receptor, la complejidad de esto se torna algo desagradable para la implementación en un terminal móvil de un ancho de banda por encima de los 5MHz. Además OFDM es óptimo para el enlace descendente, especialmente cuando se combina con multiplexación espacial.

Los beneficios adicionales de OFDM son:

- OFDM proporciona acceso de dominio de frecuencia, así se permite un adicional grado de libertad al canal dependiente comparado con HSPA.
- Flexibles asignaciones de ancho de banda son fácilmente respaldadas por OFDM, al menos desde una perspectiva de banda base por la variación de números de subportadoras que OFDM utiliza para su transmisión.
- Transmisión *broadcast/multicast*, donde la misma información es trasmitida por múltiples estaciones base, que es sencillo con OFDM.

3.1.2 SC-FDMA.

Para el enlace ascendente de LTE, se ha seleccionado un tipo de transmisión con portadora única basado en DFT-*spread* OFDM (DFTS-OFDM), debido a la combinación de las propiedades tales como:

- Pequeñas variaciones en la potencia instantánea de la señal transmitida.
- Posibilidad de baja complejidad para una alta calidad de igualación en el dominio de frecuencia.
- Posibilidad de FDMA con asignación flexible de ancho de banda.

El principio básico de la transmisión de DFT-OFDM se ilustra en la Figura 3.7. Es similar a la modulación OFDM, y se basa en un bloque adaptado para la generación de la señal.

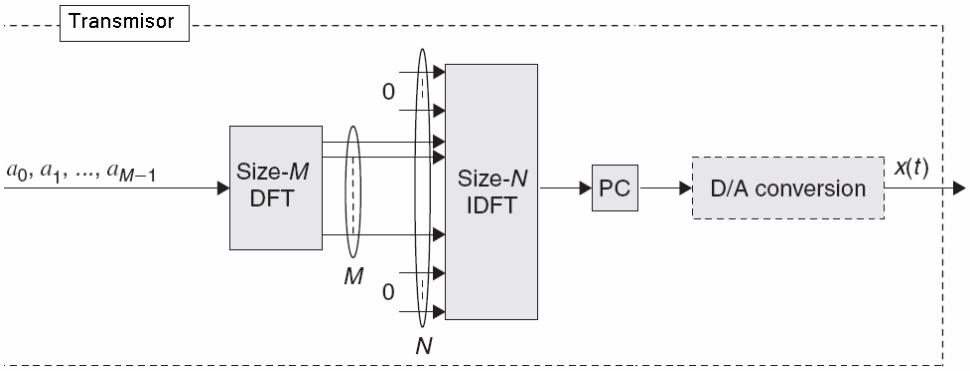

Figura 3.7 *Generación de la señal DFTS-OFDM.*

También, al igual que en OFDM, es preferible insertar un prefijo cíclico para cada bloque en la transmisión. La presencia de un prefijo cíclico permite una complejidad menor de igualdad del dominio de frecuencia en el lado receptor. El principal beneficio de DFT-OFDM, en comparación con una transmisión multi-portadora OFDM, es que reduce las variaciones en la potencia de transmisión instantánea, lo que conlleva a la posibilidad de aumentar la eficiencia del amplificador de potencia.

El principio básico de la demodulación DFTS-OFDM se ilustra en la Figura 3.8 y las operaciones son básicamente inversas a la generación de la señal mostrada anteriormente en la Figura 3.7.

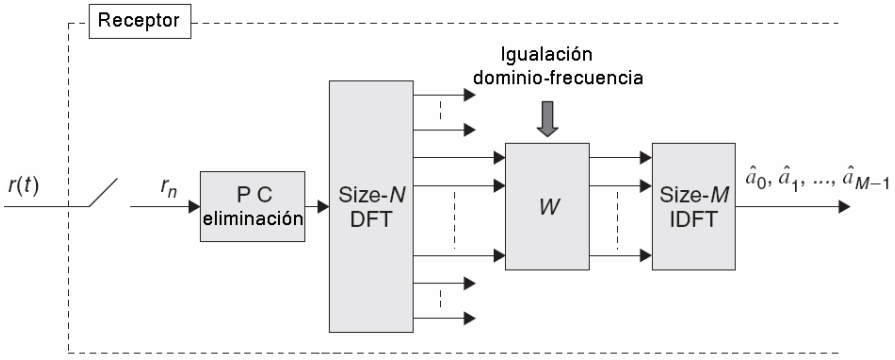

Figura 3.8 *Demodulación de la señal DFTS-OFDM.*

El uso de una modulación con una sola portadora en el enlace ascendente, es originado por un valor inferior en la relación peak-promedio de la señal transmitida en comparación con la transmisión multi-portadora. La relación peak-promedio de la señal transmitida y el promedio de la potencia transmitida, puede ser para un dado amplificador de potencia. La transmisión de portadora única, permite por lo tanto el uso más eficiente de la potencia del amplificador, lo que se traduce en un aumento de cobertura que es muy importante para la potencia limitada del terminal. Por otro lado, la igualación requerida para manejar la corrupción de la señal de portadora única, debido al desvanecimiento de frecuencia selectiva, es un tema menor en el enlace ascendente por las pocas restricciones en los recursos de procesamiento de señal en la estación base en comparación con el terminal móvil.

En contraste con los enlaces ascendente no ortogonales WCDMA/HSPA, los que también funcionan por medio de transmisión de portadora única, el enlace ascendente en LTE se basa en la separación ortogonal de usuarios en tiempo y frecuencia, en un principio, la separación del usuario ortogonal puede lograrse en el dominio del tiempo sólo por la asignación del total de ancho de banda en la transmisión del enlace ascendente a un usuario a la vez [1]. La separación ortogonal es beneficiosa, ya que evita la interferencia intercelda (ICI). Sin embargo, la asignación de un gran recurso instantáneo de ancho de banda a un único usuario, no es una estrategia suficiente en situaciones en las que la velocidad de transmisión de datos es limitada,

principalmente por la transmisión de potencia más que el ancho de banda. En tales situaciones, un terminal es designado para transmitir sólo en una parte del total del ancho de banda, y otros terminales pueden transmitir en paralelo con el resto del espectro. Por lo tanto, como el enlace ascendente de LTE contiene un componente de dominio de frecuencia de múltiple acceso, el sistema de transmisión de este enlace es llamado también como *Single Carrier – Frecuency Division Multiple Access* (SC-FDMA).

La característica clave de estas transmisiones es normalmente la rapidez y las variaciones significativas en condiciones instantáneas del canal. Estas variaciones se deben a; desvanecimiento por sombra, pérdida de camino dependiente en la distancia que afectará significativamente el promedio de señal recibida y por ultimo, interferencia en el receptor debido a las transmisiones de otras celdas y por otras terminales que también impactarán el nivel de interferencia. Todas estas variaciones deben tenerse en cuenta para una mejor calidad del enlace.

3.2 Programación del canal y Adaptación de la velocidad de datos.

El corazón del sistema de transmisión de LTE, es el uso de transmisión de canales compartidos, el que esta bien adaptado a las diferentes necesidades de recursos planteados por los paquetes de datos y también posibilita varias de las otras tecnologías claves utilizadas por LTE.

La programación *(scheduling)* de controles, en cada instante de tiempo, debería ser asignado para aquellos usuarios que comparten recursos. Esto también determina la velocidad de transmisión de datos que se utilizará para cada enlace, velocidad de transmisión adaptada que puede ser vista como una parte de la programación. La programación es un elemento clave y en gran medida determina el rendimiento global del enlace descendente, especialmente en una red muy cargada. Ambas transmisiones de enlace ascendente y descendente están sujetas a una ajustada programación. En relación con HSPA, la programación enlace descendente transmite a un usuario cuando las condiciones del canal tienen la ventaja de aprovechar al máximo la velocidad de transmisión de datos, y es en cierta medida posible el *Enhanced Uplink* (enlace ascendente mejorado), sin embargo, como LTE posee dominio del tiempo y también acceso al dominio de frecuencia, debido al uso de OFDM y SC-FDMA en sus respectivos enlaces. El

programador (*scheduler)* para cada frecuencia regional, puede seleccionar el canal de usuario con las mejores condiciones. En otras palabras, la configuración del canal de usuario en LTE puede tomar en cuenta variaciones no solo en el dominio del tiempo, como HSPA, sino que también en el dominio de la frecuencia, esto se ilustra en la Figura 3.9.

El canal de programación se basa en las variaciones de la calidad del canal que hay entre los usuarios para obtener una ganancia en la capacidad del sistema. Para servicios sensibles al retraso (*delay*), una programación con dominio sólo en el tiempo puede ser realizada para un usuario en particular, a pesar de que la calidad del canal no está en todo su auge. En situaciones como ésta, la explotación de las variaciones de la calidad del canal también en el dominio de la frecuencia ayudará a mejorar el rendimiento global del sistema. En LTE, las decisiones de programación pueden tomarse tan a menudo como una vez cada 1 ms y la granularidad en el dominio de la frecuencia es 180 KHz.

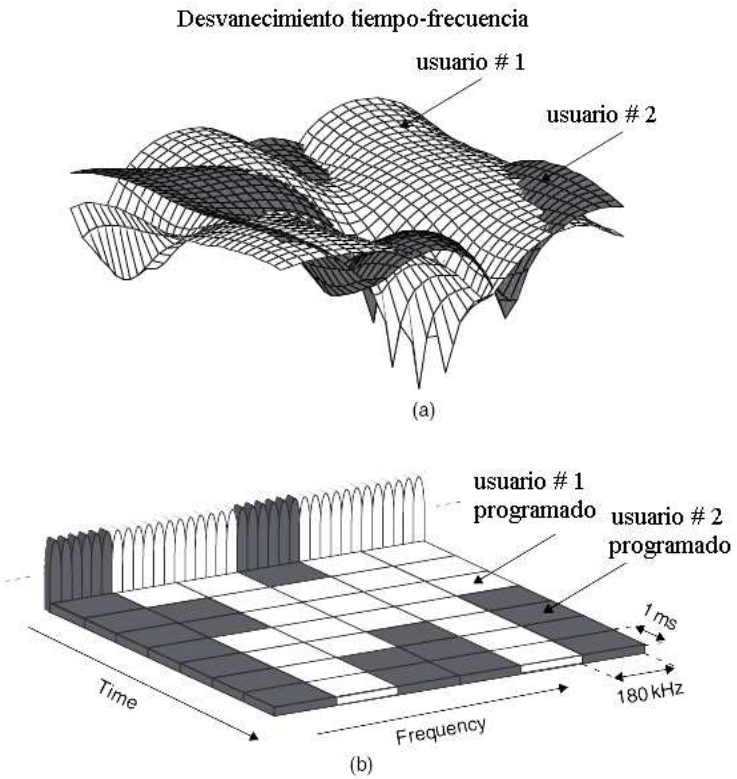

Figura 3.9 *Programación enlace descendente del canal dependiente en dominio de tiempo y frecuencia.*

3.2.1 Programación del enlace descendente.

Inicialmente se asume un enlace descendente basado en TDM con un único usuario programado en un momento. En este caso, la utilización de los recursos radio se maximiza si en cada instante de tiempo, todos los recursos se asignan al usuario con la mejor condición instantánea del canal:

- En el caso de la adaptación del enlace basado en el control de potencia, implica que la menor potencia posible transmitida puede ser utilizada para una determinada tasa de datos y así se minimiza la interferencia de las transmisiones en otras células de un determinado enlace (ver Figura 3.10 a).

- En el caso de la adaptación del enlace basado en el control de velocidad, implica que los más altos valores de velocidad de transmisión de datos son logrados para una determinada potencia transmitida o para una determinada interferencia en las otras celdas (ver Figura 3.10 b).

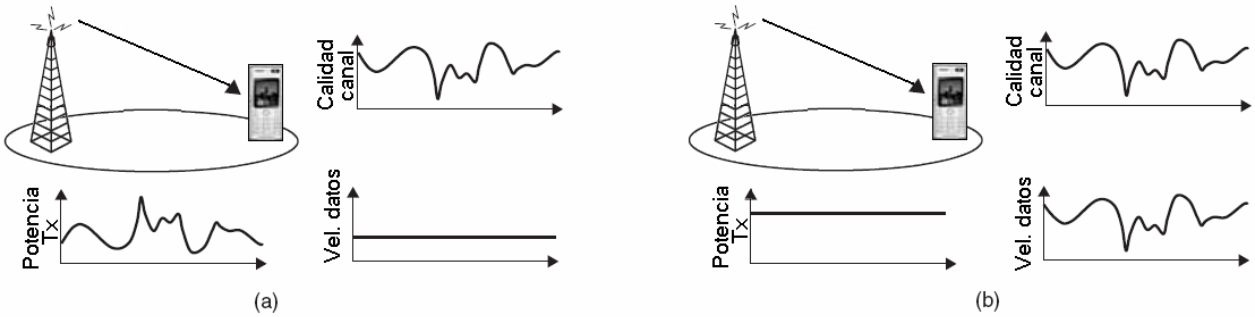

Figura 3.10 *(a) control de potencia y (b) control de velocidad.*

Sin embargo, si es aplicado al enlace descendente, el control de la potencia transmitida en combinación con la programación TDM, implica que el total disponible de las celdas que transmitirán potencia, no se utilizó en su totalidad. Así, el control de velocidad de datos es generalmente preferida [1].

Lo expuesto anteriormente es un ejemplo de la programación del canal dependiente, donde el programador toma en cuenta las condiciones instantáneas del enlace radio. La programación del usuario con las mejores condiciones del enlace radio, es a menudo referida como programación *max-C/I* (o máximo porcentaje). Dadas las condiciones para los diferentes enlaces radio, casi en todo momento existe un canal de usuario cuya calidad está cerca de su punto máximo (véase Figura 3.11). Así, finalmente el canal utilizado para la transmisión suele tener una alta calidad, y una elevada velocidad de transmisión para ser utilizados, generando un sistema de alta capacidad. La ganancia obtenida por la transmisión a los usuarios en condiciones favorables es comúnmente conocida como diversidad multi-usuario, presentándose ganancias mayores, grandes variaciones del canal y un gran número de usuarios en una celda.

En el enlace descendente, cada informe del terminal es una estimación de la calidad instantánea del canal a la estación base. Estas estimaciones se obtienen mediante la medición de una señal de referencia, transmitida por la estación base y se utiliza también para efectos de demodulación. Basado en esta estimación, el programador del enlace descendente puede asignar recursos a los usuarios, teniendo en cuenta las cualidades del canal. En un principio, el terminal programado puede asignar una combinación arbitraria de 180 KHz de ancho de bloques de recursos en cada intervalo de programación de 1 ms.

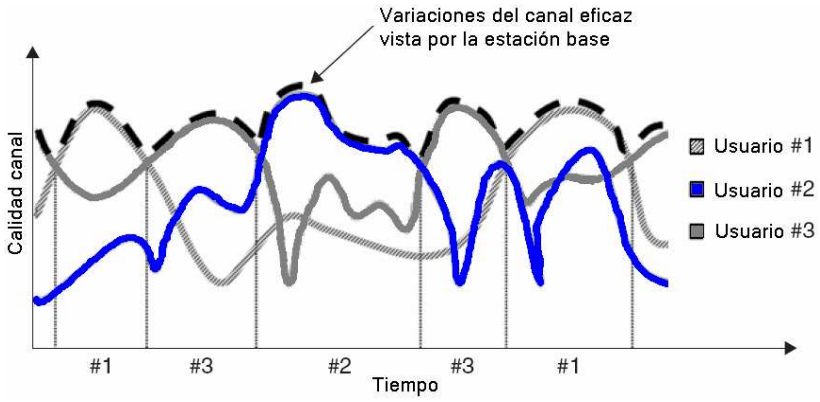

Figura 3.11 *Programación canal dependiente.*

3.2.2 Programación del enlace ascendente.

Principalmente los recursos de potencia del enlace ascendente se distribuyen entre los usuarios, mientras que en el enlace descendente los recursos se centralizan en la estación base. Además la máxima potencia de transmisión de enlace ascendente de un solo terminal, suele ser típicamente inferior a la potencia de salida de una estación base, lo que genera un significativo impacto en la estrategia de programación. A diferencia del enlace descendente, donde a menudo se puede utilizar TDMA, normalmente la programación enlace ascendente es compartida entre la frecuencia y/o dominio de código adicionando al dominio del tiempo como un solo terminal no teniendo la suficiente potencia para utilizar eficientemente la capacidad de enlace.

El enlace ascendente de LTE se basa en la separación ortogonal de usuarios, y ésta es la labor del programador del enlace ascendente para asignar recursos en ambos dominios, de tiempo y de frecuencia (TDMA/FDMA combinados) para los diferentes usuarios. Las decisiones de configuración son muy importantes, el estudio por medio de 1 ms, el control de los terminales móviles que están autorizados a transmitir dentro de una celda durante un determinado intervalo de tiempo, también se debe tomar en cuenta en qué frecuencia la transmisión tiene lugar, y qué tipo de enlace ascendente de datos (formato de transporte) se utilizará. Hay que tener presente que sólo una región de frecuencias contiguas pueden ser asignados a los terminales en el enlace ascendente como consecuencia de la utilización de una portadora simple en la transmisión del enlace ascendente de LTE.

Las condiciones del canal se pueden tomar en cuenta también en el proceso de programación del enlace ascendente, similar a la programación del enlace descendente. Sin embargo, como se examinará más adelante, la obtención de información acerca de las condiciones del canal de enlace ascendente es una tarea no trivial, por lo tanto, diferentes medios para obtener la diversidad en un enlace ascendente son importantes como un complemento en los casos donde la programación del canal sometido al enlace ascendente no es utilizada.

3.2.3 Interferencia Inter-Celda.

LTE ofrece ortogonalidad entre los usuarios dentro de una celda en ambos enlaces, ascendente y descendente. Así, el desempeño de LTE en términos de eficiencia del espectro y las disponibles velocidades de transmisión de datos, es más limitada por la interferencia de otras celdas en comparación con WCDMA/HSPA. Los medios para reducir o controlar la interferencia entre celdas pueden, potencialmente proporcionar importantes beneficios al rendimiento de LTE, especialmente en términos del servicio, como las velocidades de datos, que pueden ser ofrecidos a los usuarios en el borde de la celda.

La coordinación de la interferencia inter-celda es una estrategia de configuración en donde las velocidades de transmisión de datos en el borde de la celda son incrementadas mediante la adopción considerada de interferencia entre celdas. Básicamente, la coordinación de la interferencia implica ciertas restricciones en el dominio de frecuencia para las configuraciones de ambos enlaces en una celda y para el control de la interferencia entre celdas. La transmisión de potencia es restringida en partes del espectro en una celda, la interferencia vista en las celdas cercanas en esta parte del espectro se reduce [29]. Esta parte del espectro puede ser utilizado para proporcionar mayores velocidades de transmisión para los usuarios de la celda cercana o vecina. En esencia, el factor de reutilización de frecuencias es diferente en distintas partes de la celda (ver Figura 3.12).

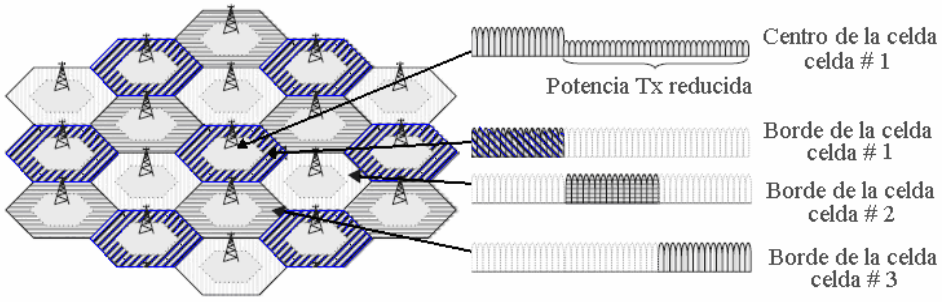

Figura 3.12 *Ejemplo de Coordinación de interferencia entre las células, donde partes del espectro es restringido en términos de transmisión de potencia.*

Hay que tener en cuenta que la coordinación de interferencia entre las celdas es principalmente una estrategia de configuración, para la situación de las celdas cercanas entre si. Lo que significa que ésta coordinación de interferencia es en gran medida un tema de implementación y difícilmente visible en las especificaciones. Esto también implica que dicha coordinación puede aplicarse sólo a un conjunto seleccionado de las celdas, en función de los requisitos establecidos por un determinado despliegue.

3.3 Esquema de Retransmisiones Selectivas.

El tipo de esquema para retransmisiones selectivas llamado *Hybrid ARQ* (HARQ) con rápida combinación, es el utilizado en LTE. El HARQ es la combinación de códigos de corrección de errores (FEC) con un enfoque para manejar los errores de retransmisión llamado ARQ *(Automatic Repeat reQuest)*, utilizado prácticamente en todos los modernos sistemas de comunicación. En un esquema ARQ, el receptor utiliza un código de error de detección, normalmente un control de redundancia cíclica (CRC), para detectar si el paquete es recibido en error o no. El HARQ utiliza el código de corrección de errores para corregir un subconjunto de todos aquellos errores y se basa en la detección de errores para detectar errores incorregibles. Los paquetes recibidos erróneamente se descartan y el receptor solicita la retransmisión de paquetes dañados. Sin embargo, a pesar de que el paquete no ha sido posible descodificar, la señal recibida aún contiene la información, la cual es perdida por la eliminación de los paquetes recibidos erróneamente. Esta deficiencia está manejada por el sistema HARQ con rápida combinación. En el HARQ, los paquetes recibidos con error se almacenan en una memoria, y más tarde son combinados con la retransmisión para obtener una sola combinación de paquetes que es más fiable que sus elementales.

La retransmisión en cualquier sistema HARQ, por definición, debe representar el mismo conjunto de bits de información como la transmisión original. Sin embargo, el conjunto de bits codificados transmitidos en cada retransmisión puede ser seleccionado de manera diferente. El HARQ con rapida combinación es por lo tanto clasificado dentro de un método de combinación de paquetes (*Chase combining*) y redundancia incremental *(Incremental Redundancy),* dependiendo si los bits retransmitidos deben ser idénticos a los de la transmisión original o no.

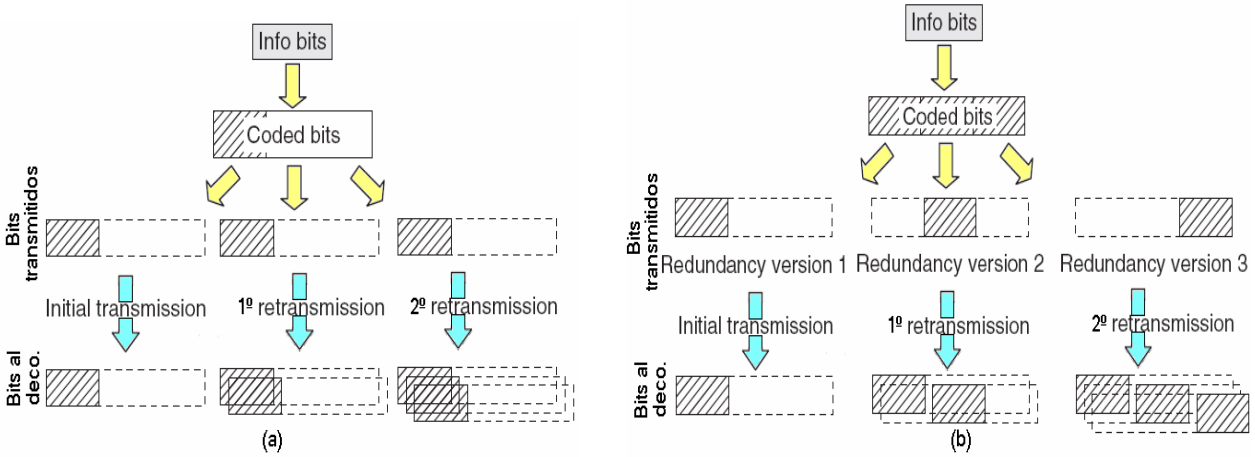

Figura 3.13 *Ejemplos, (a) Chase combining y (b) Incremental Redundancy.*

Por muchas razones similares que en HSPA, LTE utiliza este sistema para permitirle al terminal una rápida solicitud de las retransmisiones, por la recepción errónea del transporte y por el hecho de proporcionar una herramienta para la adaptación de la velocidad de transmisión comprendida. Las retransmisiones son solicitadas rápidamente después de cada transmisión de paquetes, lo que minimiza el impacto sobre el rendimiento del usuario desde la recepción errónea de los paquetes. El incremento de la redundancia se utiliza en la rápida combinación y en los *buffers* receptores con *soft bits* para ser capaces de hacer una suave combinación entre los intentos de transmisión.

En la combinación suave, las señales radioeléctricas recibidas de los distintos emplazamientos son combinadas coherentemente antes de la decodificación. De este modo se obtienen mejores prestaciones, ya que no solamente se obtiene una ganancia de diversidad, sino también, una ganancia de potencia del orden de 2-3 dB. Sin embargo, esta estrategia requiere mayor memoria en los terminales para almacenar los *soft* bits de cada radio enlace y que las transmisiones entre celdas estén sincronizadas en un determinado rango [21].

3.4 Múltiples Antenas.

LTE desde un comienzo posee la característica de ser compatible con el soporte de múltiples antenas tanto en la estación base y en el terminal como una parte integral de las especificaciones. El uso de múltiples antenas es la tecnología clave para llegar a los objetivos más competitivos en el rendimiento de LTE y se utilizan de diferentes maneras (ver Fig. 3.14):

- La múltiple recepción de antenas se puede utilizar de manera diversa. Para las transmisiones del enlace ascendente, ésta se ha utilizado en muchos sistemas celulares durante varios años. Sin embargo, como la recepción con doble antena es la línea de referencia para todos los terminales LTE, el rendimiento del enlace descendente también es mejor aprovechado. La forma más sencilla de usar este sistema es la diversa recepción clásica para reprimir el desvanecimiento, pero los beneficios adicionales pueden lograrse en escenarios de interferencia limitada si las antenas también se utilizan no sólo para ofrecer la diversidad contra éste, sino que también para suprimir las interferencias.

- La transmisión de múltiples antenas a la estación base, se puede utilizar para transmitir diversos y diferentes tipos de *beamforming*. El principal objetivo del *beamforming* es el de mejorar la recepción SNR, y eventualmente mejorar la capacidad del sistema y la cobertura.

- El multiplexado espacial (*Spatial Multiplexing),* referido al sistema MIMO, utilizando múltiples antenas tanto en el transmisor y el receptor, es el apoyo a LTE que da lugar a una mayor velocidad de transmisión de datos, permitiendo las condiciones del canal, en escenarios de ancho de banda limitado para la creación de varios canales paralelos.

Como alternativa o complemento a la recepción con múltiples antenas, la diversidad y al *beamforming* puede también ser logrado mediante la aplicación de múltiples antenas en el lado del receptor. El uso de estas antenas para transmitir es principalmente importante para el enlace descendente, es decir, en la estación base. En este caso, el uso de múltiples antenas para

transmitir proporciona una oportunidad sin la necesidad de agregar antenas receptoras y una correspondiente recepción en cadena al terminal móvil. Por otra parte, debido a razones de complejidad del uso de múltiples antenas para transmitir en el enlace ascendente, es decir, en el terminal móvil, es menos atractivo. En este caso, normalmente es preferible aplicar adicionales antenas de recepción y correspondientes reacciones en la recepción de la estación base.

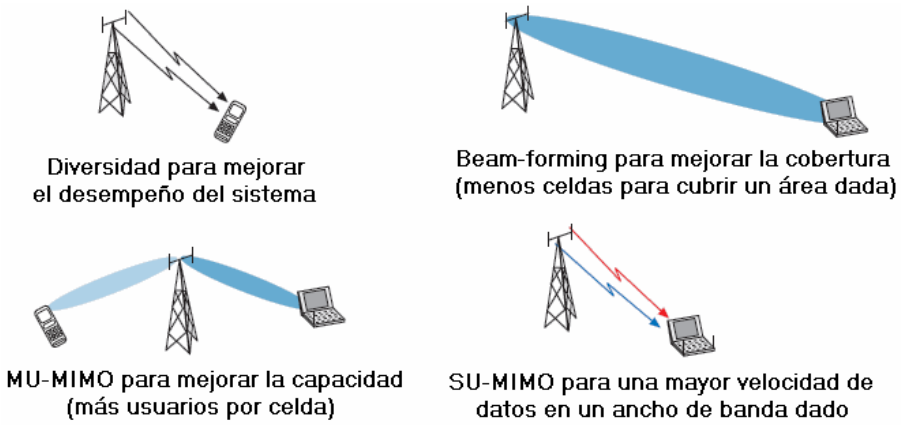

Figura 3.14 *Técnicas de Múltiples antenas en LTE.*

En general, las diferentes técnicas de múltiples antenas son beneficiosas en distintas situaciones. Por ejemplo en la baja relación de SNR y SIR (relación señal a interferencia), MIMO proporciona beneficios relativamente limitados. En cambio, en tales escenarios de múltiples antenas en el lado transmisor debe ser usado para aumentar la relación SNR/SIR por medio del *beamforming*. Por otra parte, en escenarios donde la relación de SNR y SIR es alta, por ejemplo, en pequeñas celdas, aumentando la calidad de la señal que proporciona, además ganancias relativamente menores como la factible velocidad de transmisión de datos, son principalmente limitados en el ancho de banda en lugar de SNR/SIR. A causa de estas situaciones, el multiplexado espacial debe ser utilizado en lugar de aprovechar plenamente las buenas condiciones del canal. El sistema de múltiples antenas usado está bajo el control de la estación base, por lo que se puede seleccionar un plan adecuado para cada transmisión.

3.5 Soporte Multicast y Broadcast.

La difusión o *broadcast* de múltiples celdas, implica la transmisión de la misma información desde múltiples celdas. Mediante la explotación de éste en el terminal por la utilización eficaz de potencia de la señal desde múltiples sectores, puede lograrse una mejora sustancial en la cobertura (o una gran difusión de velocidad de transmisión de datos). Esto ya es desarrollado en WCDMA, donde en el caso de *broadcast/multicast* de múltiples celdas, un terminal móvil puede recibir señales procedentes de varias celdas (ver Figura 3.15) y ser activado por una combinación suave de éstos dentro del receptor.

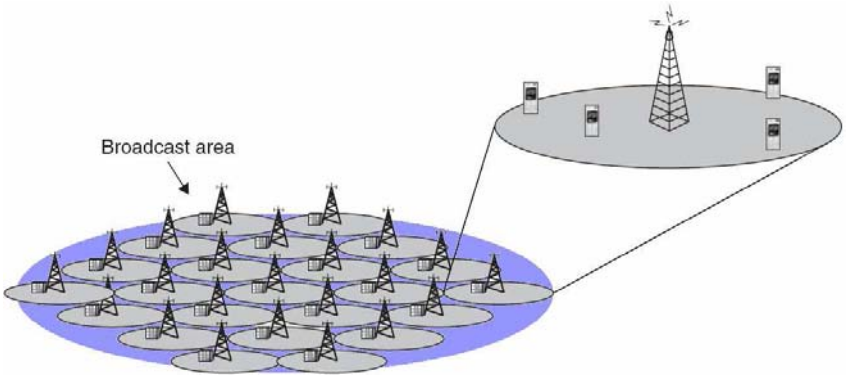

Figura 3.15 *Escenario Broadcast.*

Esto tiene a LTE un paso más allá para proporcionar mayor eficiencia de difusión multi-celda. Mediante la no transmisión de señales idénticas desde múltiples sectores de celda (con idéntica codificación y modulación), pero también sincronizando el tiempo de la transmisión entre las celdas, la señal en el terminal móvil se publicará exactamente como una señal de transmisión desde un único sector de celda y sujeto a la propagación multi-ruta. Debido a la estabilidad de la técnica OFDM, la propagacion multi-ruta, es también referida como la transmisión *Multicast-Broadcast Single-Frecuency Network* (MBSFN), no sólo servirá para mejorar la señal recibida, sino que también para eliminar las interferencias entre las celdas. Así, con OFDM, el rendimiento *broadcast/multicast* de múltiples celdas eventualmente puede estar limitado sólo por ruido y puede entonces, en el caso de las pequeñas celdas llegar a valores extremadamente altos.

3.6 Flexibilidad del Espectro.

Un alto grado de flexibilidad del espectro es uno de las principales características del acceso radio de LTE. El objetivo de la flexibilidad es permitir el despliegue en diversos espectros, con diferentes características, incluyendo diferentes arreglos o sistemas dúplex, diferentes bandas de frecuencia de operación y los diferentes tamaños del espectro disponible.

3.6.1 Flexibilidad en el Sistema dúplex.

Una parte importante de los requisitos de LTE en términos de flexibilidad de espectro, es la posibilidad de desplegar el acceso radio basada en LTE en ambos espectros, pareados y no pareados, estos deben apoyar a LTE tanto en la división de frecuencia y la división en el tiempo basado en los sistemas dúplex. *Frecuency Division Duplex* (FDD), como se ilustra en la Figura 3.16a, implica que la transmisión de enlace ascendente y descendente ocurren en diferentes bandas de frecuencia cuando están suficientemente separados. *Time Division Duplex* (TDD), como se ilustra la Figura 3.16b, implica que la transmisión de enlace ascendente y descendente ocurren en diferentes intervalos de tiempo que no se solapan. Por lo tanto, TDD puede operar en el espectro no pareado, mientras que FDD requiere el espectro pareado.

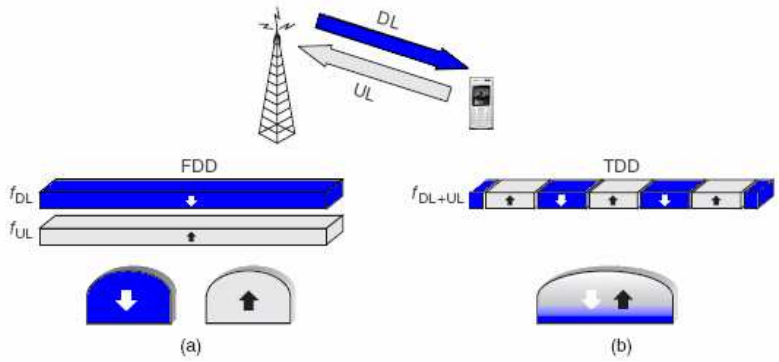

Figura 3.16 *(a) FDD vs. (b) TDD, enlace ascendente y descendente.*

El apoyo para ambos espectros, forma parte del comienzo de las especificaciones Release 99 a través del uso de FDD basado en el acceso radio de WCDMA/HSPA, en las asignaciones pareadas y TDD basado en el acceso radio de TD-CDMA/TD-SCDMA, en asignaciones no

pareadas. Sin embargo, esto se logra por medio de relación de diferentes tecnologías de acceso radio y, en consecuencia, los terminales calificados de las operaciones FDD y TDD son relativamente poco frecuentes, en cambio, LTE soporta ambas operaciones dentro de una sola tecnología de acceso radio, destacando un mínimo de desviación entre FDD y TDD para la base del acceso radio. La diferencia entre ambas operaciones radica principalmente en la estructura de la trama (*frame*) ilustrada en la Figura 3.17.

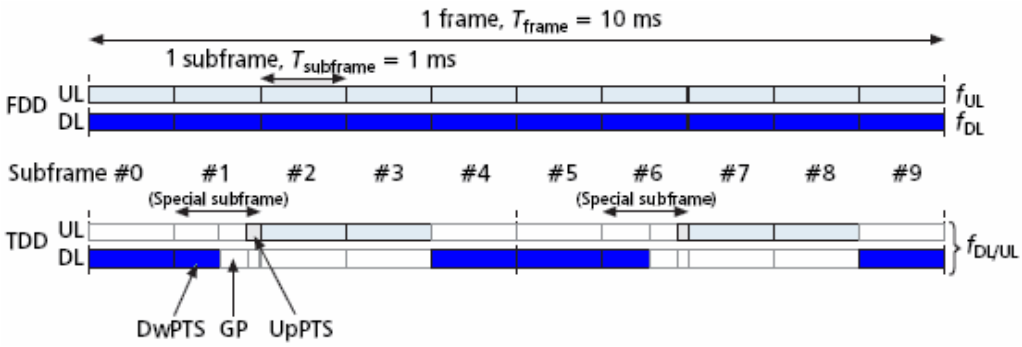

Figura 3.17 *Estructura de la trama.*

En el caso de la operación FDD (parte superior de la Figura 3.17), hay dos frecuencias portadoras, una para la transmisión de enlace ascendente (f_{UL}) y uno para la transmisión de enlace descendente (f_{DL}). Así, durante cada trama, hay diez subtramas de enlace ascendente y diez subtramas del descendente, y la transmisión de ambos puede ocurrir simultáneamente en una celda. Correspondientemente existe una relación uno-a-uno entre las subtramas de enlace ascendente y descendente, las cuales son explotadas en el diseño de control de señalización.

En el caso de la operación TDD (parte inferior de la Figura 3.17), sólo hay una frecuencia portadora, y las transmisiones de enlace ascendente y descendente siempre estan separadas en el tiempo, también esto se lleva a cabo dentro de la celda. Como el número de subtramas de enlace ascendente y descendente pueden ser diferentes, no hay una correspondencia uno-a-uno entre las subtramas, dando lugar a algunas diferencias de menor importancia en el control de señalización de diseño entre las FDD y TDD.

3.6.2 Flexibilidad en la Frecuencia de banda de operación.

LTE es pronosticado para el desarrollo en base a la necesidad de saber cúando y dónde el espectro puede estar disponible, ya sea por la asignación de un espectro nuevo para comunicación móvil, tales como la banda de 2,6 GHz (ver Figura 3.18), o por la migración a LTE del espectro actualmente usado para otras tecnologías, tales como la segunda generación de Sistemas GSM, o incluso las tecnologías de radio no móviles tales como el actual espectro de *broadcast*. Como consecuencia de ello, se requiere que el acceso radio LTE debe ser capaz de operar en una amplia gama de bandas de frecuencias, desde la banda de 450 MHz hasta 2,6 GHz.

FDD

Banda	"Identificador"	Nombre banda	Frecuencias (MHz) UL/DL
1	IMT Core Band	2.1 GHz	1920-1980/2110-2170
2	PCS 1900	1900 MHz	1850-1910/1930-1990
3	GSM 1800	1800 MHz	1710-1785/1805-1880
4	AWS (US & other)	1.7/2.1 GHz	1710-1755/2110-2155
5	850	850 MHz	824-849/869-894
6	850 (Japan)	800 MHz	830-840/875-885
7	IMT Extension	2.6 GHz	2500-2570/2620-2690
8	GSM 900	900 MHz	880-915/925-960
9	1700 (Japan)	1700 MHz	1750-1785/1845-1880
10	3G Americas	Ext 1.7/2.1 GHz	1710-1770/2110-2170
11	UMTS1500	1500MHz	1428-1453/1476-1501
12	*US 700*	*Baja 700 MHz*	*698-716/728-746*
13		*Alta 700 MHz*	*776-788/746-758*
14			*788-798/758-768*
17			*704-716/734-746*

TDD

Banda	"Identificador"	Frecuencias (MHz)
33,34	TDD 2000	1900-1920 2010-2025
35,36	TDD 1900	1850-1910 1930-1990
37	PCS Center Gap	(1915) 1910-1930
38	IMT Extension Center Gap	2570-2620
39	China TDD	1880-1920
40	*2.3 TDD*	*2300-2400*

Adicional (FDD&TDD)

	3.5 GHz	*3400-3600*
	3.7 GHz	*3600-3800*

Figura 3.18 *Actuales bandas 3GPP, con rojo principalmente para LTE.*

La posibilidad de operar una tecnología de acceso radio en distintas bandas de frecuencia no es nada nuevo. Por ejemplo, la triple banda de los terminales GSM son comunes, capaz de operar en las bandas de 900, 1800 y 1900 MHz. Desde un punto de vista de acceso a la funcionalidad de radio, esto no tiene un impacto limitado en las especificaciones de la capa física de LTE, la cual no asume ninguna banda específica [15]. Lo que puede diferenciarse en términos de condiciones, entre las distintas bandas de frecuencia que son principalmente los requerimientos RF más específicos tales como; permitir la máxima potencia de transmisión, requisitos y límites en *out-of-band-emission* (emisiones fuera del ancho de banda), etc. Una de las razones de esto, es que las restricciones externas impuestas por los organismos reguladores, pueden variar entre las distintas bandas de frecuencias.

3.6.3 Flexibilidad del Ancho de banda.

Relacionado con la posibilidad de desarrollar el acceso radio de LTE en diferentes bandas de frecuencias, es la oportunidad de LTE para que pueda operar con diferentes anchos de banda de transmisión en el enlace ascendente y descendente. La razón principal de esto, es que la cantidad de espectro disponible para LTE puede variar considerablemente entre diferentes bandas de frecuencia y también en función de la situación exacta del operador. Además, la posibilidad de operar en diferentes asignaciones de espectro, da la posibilidad de migración gradual del espectro de radio de otras tecnologías de acceso a LTE.

LTE apoya la operación en una amplia gama de atribuciones de espectro, alcanzado por un ancho de banda de transmisión flexible que forma parte de las especificaciones 3GPP. Eficientemente soporta una muy alta velocidad de transmisión de datos cuando el espectro esta disponible y cuando se es necesario un amplio ancho de banda de transmisión, sin embargo, una gran cantidad de espectro no siempre estará disponible, ya sea debido a la banda de operación o a una migración gradual desde otra tecnología de acceso radio, en cuyo caso LTE puede funcionar con un ancho de banda de transmisión más estrecho. Obviamente, en tales casos, el máximo alcanzable de la velocidad de transmisión de datos se reducirá proporcionalmente. Más concretamente, como se ilustra en la Figura 3.19, LTE permite registrar para un sistema global de ancho de banda, desde pequeñas frecuencias como 1,4 MHz hasta 20 MHz, donde las más altas son requeridas para proporcionar mayor velocidad de datos.

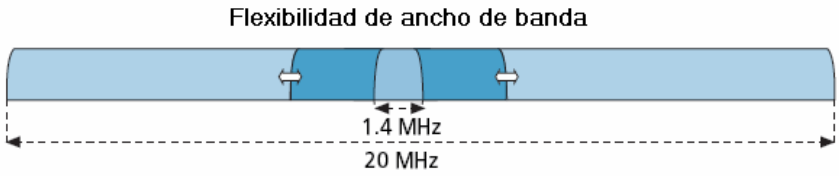

Figura 3.19 *Flexibilidad del espectro LTE.*

Todos los terminales LTE soportan el mayor ancho de banda. A diferencia de anteriores sistemas celulares, éste ofrece la posibilidad de operar para diferentes anchos de banda en enlace ascendente y descendente, permitiendo la utilización asimétrica del espectro.

3.7 Esquemas de Modulación.

Una forma directa para ofrecer altas velocidades de transmisión de datos dentro de un determinado ancho de banda, es el uso de la modulación de orden superior, lo que implica que el alfabeto de modulación se amplía para incluir más alternativas de señalización y para más bits de información se permite hacer la comunicación por medio de la modulación de símbolos.

Los esquemas de modulación disponibles para datos de usuario en el enlace ascendente y descendente son QPSK, 16QAM y 64QAM. Los dos primeros son útiles en todos los dispositivos, mientras que el apoyo para 64QAM en el enlace ascendente es la capacidad del equipamiento de usuario.

En el caso de la modulación QPSK, el alfabeto de la modulación consiste en cuatro diferentes alternativas de señalización, que pueden ser ilustradas como cuatro puntos diferentes en un plano bidimensional (ver la Figura 3.20a). Con 4 alternativas diferentes de señalización, QPSK permite hasta 2 bits de información que son comunicados durante cada intervalo de modulación de símbolo. Mediante la extensión 16QAM (Figura 3.20b), 16 diferentes alternativas de señalización están disponibles permitiendo hasta 4 bits de información. La extensión a 64QAM (Figura 3.19c), con 64 diferentes alternativas de señalización, permite hasta 6 bits de información que son comunicados por intervalo de símbolo. Al mismo tiempo, el ancho de banda de la señal transmitida, en un principio es independiente del tamaño del alfabeto de modulación y depende principalmente de la tasa de modulación, es decir, del número de símbolos de la modulación por segundo. El máximo ancho de banda utilizado es expresado por bit/s/Hz.

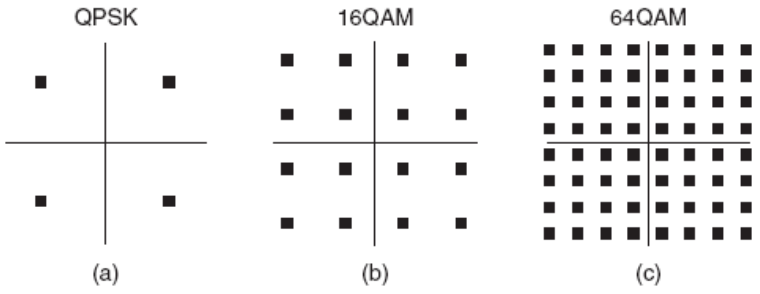

Figura 3.20 *Constelaciones de modulación en LTE.*

El uso de la modulación de orden superior proporciona un mejor uso del ancho de banda, haciendo posible la transmisión de datos a altas velocidades, sin embargo, este aumento va de la mano con una menor inmunidad al ruido y a las interferencias, por lo que se prefiere 64QAM sólo cuando las condiciones del canal son favorables, como por ejemplo, cuando el terminal está estático y cerca de la estación base (ver Figura 3.21). Podemos ver en la figura, que a condiciones adversas, cuando se esta alejado de la estación base y en movimiento, se deberá utilizar modulación QPSK.

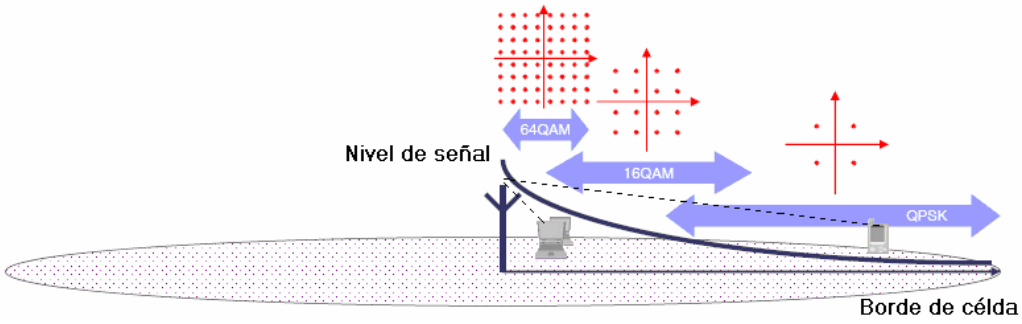

Figura 3.21 *Modulación adaptativa.*

La elección del tipo de modulación y tasa de codificación se hace en base a información del canal que el terminal envía a la estación base. El equipamiento de usuario evalúa las condiciones radioeléctricas del enlace y, de acuerdo a esto, envía un indicador a la estación base, denominado CQI (*Channel Quality Indicator*).

CAPÍTULO IV
ARQUITECTURA DE RED Y PROTOCOLOS

El objetivo de este capítulo es entregar detalles de la arquitectura de red LTE con el fin de describir los elementos funcionales de ella, así como las interfaces y protocolos. Una especial atención se dará al trabajo del 3GPP llamado Evolución de Arquitectura del Sistema (*SAE - System Architecture Evolution*). Así, para entender de donde proviene la arquitectura del sistema SAE, se considera la red de acceso y el núcleo de red utilizado por WCDMA/HSPA describiendo brevemente las conexiones, similitudes y diferencias con respecto al sistema de LTE. Finalmente se entregan las descripciones de los protocolos en la arquitectura de la interfaz radio.

4.1 Antecedentes.

El término "arquitectura del sistema" describe la asignación de las funciones necesarias para los nodos lógicos y los requisitos de interfaces entre los nodos. En el caso de un sistema móvil, tal como WCDMA/HSPA y LTE, la mayoría de las funciones necesarias para la interfaz de radio son normalmente llamadas funciones de red de acceso radio. Sin embargo, en una red móvil varias funciones adicionales son necesarias para poder proporcionar los servicios de carga necesaria para uso del operador, de autenticación necesaria para certificar que el usuario es un usuario válido, servicio de configuración necesario para asegurar que hay conexión de un extremo a otro, etc. Por lo tanto, existen funciones no relacionadas directamente con la tecnología de acceso radio en sí, pero necesaria para cualquier tecnología de acceso radio. Esas funciones son normalmente llamadas funciones de núcleo de red. El hecho de que existen diferentes tipos de funciones en un sistema celular, ha llevado a que la arquitectura del sistema se divida a en dos partes, en red de acceso radio (RAN) y en núcleo de red (CN).

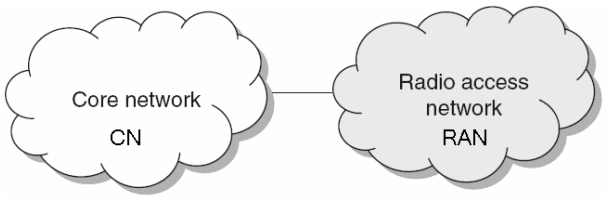

Figura 4.1 *Núcleo de red (CN) y Red de acceso radio (RAN).*

Además, similar a WCDMA/HSPA y como a la mayoría de los otros sistemas de comunicación modernos, el procesamiento especificado para LTE se estructura en diferentes capas de protocolo. Aunque varias de estas capas son análogas a los utilizados por el sistema WCDMA/HSPA, hay algunas diferencias, por ejemplo debido a las diferencias en la estructura general entre ambas tecnologías.

Dentro de la estructura de protocolo LTE existen múltiples entidades que trabajan sobre los datos transmitidos, en este caso paquetes IP, antes de que se realice la transmisión por medio de la interfaz radio, los cuales son:

- *Packet Data Convergente Protocol* (PDCP), realiza compresión de encabezado IP para reducir el número de bits necesario para transmitir por la interfaz radio.

- *Radio Link Control* (RLC), se encarga de la segmentación/concatenación, manipulación de la retransmisión, y secuencia de la entrega a las capas más altas.

- *Medium Access Control* (MAC), maneja las retransmisiones HARQ y la programación del enlace ascendente y descendente. La MAC ofrece servicios al RLC en forma de canales lógicos.

- *Physical Layer* (PHY), se preocupa de la codificación y decodificación, modulación y demodulación y otras típicas funciones de la capa física.

- *Radio Resource Control* (RRC), es un elemento clave de la capa del protocolo de señalización que soporta muchas funciones entre el terminal y el nodo de la arquitectura de red LTE/SAE, el eNB.

4.2 División de funciones entre RAN y CN.

Para WCDMA/HSPA, la idea detrás de la división funcional es mantener el núcleo de red sin conocimiento de la tecnología de acceso radio y de su distribución. Esto significa que la RAN debería estar en control de toda la funcionalidad, optimizando la interfaz radio y que las celdas no estén manifestadas en el núcleo de red. En consecuencia, el núcleo de red se puede utilizar para cualquier tecnología de acceso radio que adopte la misma división funcional.

Para encontrar el origen es necesario volver a la arquitectura del sistema GSM, uno de los problemas de ella es que los nodos del núcleo de red tienen una visibilidad completa de las celdas en el sistema. Por lo tanto, cuando se agrega una celda en el sistema, los nodos del núcleo de red necesitan ser actualizados. En WCDMA/HSPA, el núcleo de red no conoce las celdas. En cambio, el núcleo de red sabe acerca de las áreas de servicio y la RAN traduce las áreas de servicio en las celdas. Así, al añadir una nueva celda en un área de servicio, el núcleo de red no tiene por qué ser actualizado.

La segunda gran diferencia en comparación con GSM, es la ubicación de los protocolos de retransmisión y los *buffers* de datos en el núcleo de red GSM. Desde que los protocolos de retransmisión fueron optimizados para la interfaz radio GSM, aquellos protocolos fueron de interfaz específica, por lo tanto, no eran adecuados para la interfaz de WCDMA/HSPA. Esto fue considerado como una debilidad del núcleo de red con todos los *buffers* y los protocolos de retransmisión fueron trasladados a la RAN para WCDMA. Así, mientras la red de acceso radio usa la misma interfaz del núcleo de red, la interfaz de usuario *Iu*, el núcleo de red puede conectar a las redes de acceso basadas en diferentes tecnologías de acceso radio.

Todavía existen divisiones funcionales en WCDMA/HSPA que no pueden ser explicadas exclusivamente con la idea de hacer el núcleo de red en una tecnología independiente de acceso radio. Las funciones de seguridad son un buen ejemplo. Una vez más, los antecedentes se remontan a GSM, que ha situado las funciones de seguridad en diferentes posiciones para conexiones de conmutación de circuitos y conmutación de paquetes. Para las conexiones de conmutación de circuitos, las funciones de seguridad se encuentran en la RAN GSM, mientras

que para las conexiones de conmutación de paquetes, las funciones de seguridad se encuentran en el núcleo de red GSM. Para WCDMA/HSPA, éste fue considerado demasiado complicado y una ubicación común de seguridad fue anhelada. La ubicación fue decidida por la RAN como la gestión de los recursos radio de señalización y la necesidad de contar con un seguro control [16].

Consecuentemente, las funciones RAN de WCDMA/HSPA son:

- Codificación, intercalación, modulación y otras típicas funciones de la capa física.
- ARQ, compresión de cabecera y otras típicas funciones de capa de enlace.
- Gestión de los recursos radio, *handover* y otras típicas funciones de control de recursos.
- Funciones de seguridad (cifrado y protección de la integridad).

Las funciones necesarias que fueron ubicadas dentro el núcleo de red son:

- Tarificación.
- Gestión de abonados.
- Gestión de la movilidad (esto es hacer el seguimiento de los usuarios en itinerancia en torno la red y en otra redes).
- Portador de la gestión y la calidad del servicio de manipulación.
- Políticas de control de los flujos de datos de usuario.
- Interconexión con redes externas.

La división de funciones de LTE es la misma que la de WCDMA/HSPA, sin embargo, un elemento clave en el diseño de la red de radio acceso de LTE, es reducir al mínimo el número de nodos y encontrar una solución cuando la red consistía de un único tipo de nodo. Al mismo tiempo, la idea detrás del núcleo de red LTE es lo más independiente como sea posible de la tecnología de acceso radio [17].

4.3 Arquitectura RAN.

Si bien en cualquier RAN de cualquier tecnología de acceso radio como necesidad mínima, es poseer un nodo que conecte la antena de una celda. Las diferentes tecnologías de acceso radio han encontrado diversas soluciones para el número de tipos de nodos e interfaces que la RAN tendrá. Las arquitecturas RAN de WCDMA/HSPA y LTE son diferentes por lo que se detallarán a continuación sus diferencias y similitudes.

4.3.1 Red de Acceso Radio de WCDMA/HSPA.

En esencia, un factor importante para la arquitectura RAN de WCDMA/HSPA es la funcionalidad de la macro-diversidad, lo que implica que un terminal se está comunicando con varias celdas simultáneamente, y es principalmente usado por terminales cercanos a la frontera de la celda para mejorar el rendimiento. El conjunto de celdas que se está comunicando con el terminal de usuarios (UE – *User Equipment*) se conoce como el conjunto activo. Esta diversidad requiere un punto de anclaje en la RAN que divide y combina los flujos de datos, para hacer esto posible hay que tener el anclaje en el nodo que conecta la antena de una celda y tener otras celdas con sus flujos de datos dirigidos a través de ese nodo, esto no es deseable desde el punto de vista de una red de transporte. La mayoría de las redes de acceso radio tienen las limitaciones de la red de transporte, principalmente en el último tramo, que es el último salto al sitio de la antena. Además, los sitios de antena son normalmente hojas en una rama del árbol y, por tanto, un anclaje en una hoja a menudo implica que en el último tramo tiene que ser atravesado varias veces como se ilustra en la Figura 4.2. Debido a este hecho, el punto de anclaje fue especificado para ser en un nodo separado al nodo de conexión de la antena.

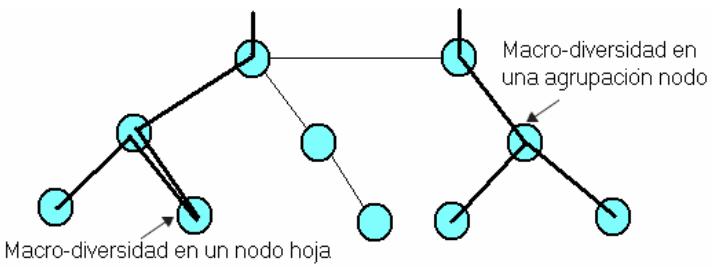

Figura 4.2 *Topología de la red de transporte influyendo en la asignación de funciones.*

Como una consecuencia de lo anterior, la capa de enlace necesita tener fin en el mismo nodo como la macro-diversidad o en un nodo más alto en la jerarquía RAN. Desde que la única razón para poner fin a la capa de enlace en otro nodo sería ahorrar recursos de transporte, y el tenerlos separados causaría una considerable complejidad, se decidió tenerlos en el mismo nodo. El nodo fue nombrado RNC (*Radio Network Controller*), ya que básicamente controla la RAN.

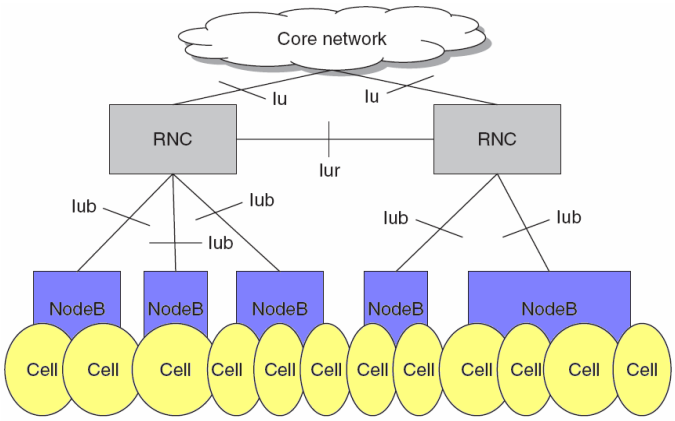

Figura 4.3 *Red de acceso radio WCDMA/HSPA: nodos e interfaces.*

La Figura 4.3 muestra una visión general de la red de acceso radio WCDMA/HSPA. Cada RNC en la red puede conectarse a cualquier otro RNC en la misma red utilizando la interfaz Iur, la cual es una amplia interfaz de red que hace posible mantener un RNC como un punto de anclaje para un terminal y ocultar la movilidad desde el núcleo de red. Además, la interfaz Iu puede realizar la macro-diversidad entre las celdas pertenecientes a diferentes RNC. Un RNC se conecta a un NodoB (NB) o más, utilizando la interfaz Iub, pero el NodoB sólo puede conectarse a un único RNC el cual lo controla. Esto significa que el RNC es el que posee los recursos radio del NodoB.

Cuando se especifican en donde deberían residir las funcionalidades RAN, se hace necesario que la propiedad de la interfaz radio de WCDMA disponga un nodo centralizado que maneje la macro-diversidad, así como el control de los recursos radio en varias celdas. Aunque el NodoB es un nodo lógico que maneja la transmisión y recepción de un conjunto de celdas, el RNC controla varios NodosB y de esa manera un área mayor. Además, la interfaz Iur hace esto posible para tener un enfoque coordinado en toda el área de cobertura de la red.

El CRNC, *controlling RNC*, establece las frecuencias que deberá utilizar el NodoB en sus celdas, éste asigna poder y programa los canales comunes de ellas, y configura qué códigos deberían ser usados por HS-DSCH (*High-Speed Downlink Shared Channel)* y la máxima potencia a utilizar. Además, decide si un usuario que accede a una RAN esta autorizado para utilizar los recursos radio en una celda que pertenece a uno de sus NodosB y especifica cuales de ellos serán. El RNC, en este caso, se convertirá en el *serving RNC* (SRNC) para el usuario.

El SRNC es el que hace la evaluación de los informes sobre las mediciones del terminal y, basándose en ellos, decide cual celda será parte del conjunto activo. También forma la calidad del terminal, la conexión de los usuarios al núcleo de red y la configuración del terminal con lo que se permite los diferentes servicios que el usuario desee utilizar.

Durante la conexión, el terminal se puede mover y en algún momento puede necesitar conectarse a una celda que pertenezca a otro RNC. En tal caso, el SRNC del terminal necesita ponerse en contacto con el RNC propietario de las celdas que el terminal tiene para utilizar, pidiendo permiso para añadir la nueva celda para el conjunto activo. Si el CRNC propietario las acepta, el SRNC manda que el terminal sume la celda a su conjunto, así el CRNC se convierte entonces en un *drift RNC* (DRNC). Cabe señalar que el *drift* RNC puede ser un *serving* RNC para el otro terminal al mismo tiempo. Por lo tanto, el *serving* y *drift* son dos diferentes roles que un RNC puede tomar en una conexión a un terminal (ver Figura 4.4).

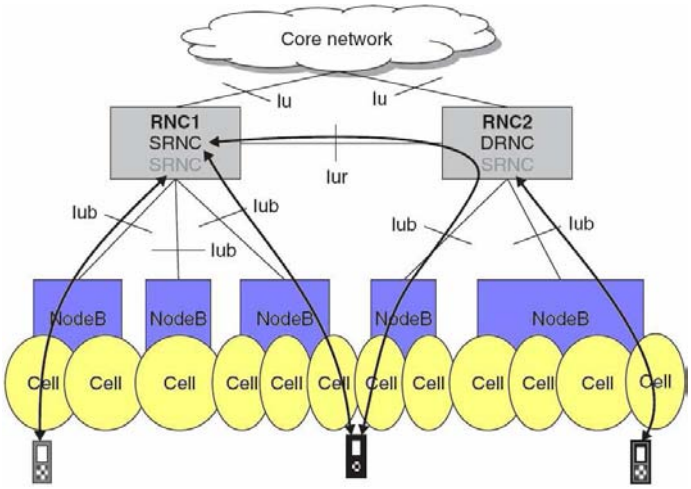

Figura 4.4 *Roles de RNC.*

Para el servicio de Multimedia de *Broadcast* y *Multicast* (MBMS), el RNC tiene un rol especial que consiste en decidir si se usan los canales *broadcast* en la celda o se usan los canales *unicast*. Cuando se utilizan los canales *unicast*, el funcionamiento es para un tráfico normal, mientras que cuando se utiliza el canal *broadcast,* el RNC tiene la opción de asegurarse de que los mismos datos sean transmitidos en el entorno de sus celdas. Es por esto, que el terminal puede realizar una macro-diversidad combinando los flujos desde las diferentes celdas, y el rendimiento del sistema puede ser incrementado.

La base de utilizar *unicast* o *broadcast* para el servicio MBMS en una celda, es típicamente establecida por el supuesto número de terminales móviles a la recepción del similar contenido al mismo tiempo en la misma celda. Si hay pocos usuarios en la celda, un enfoque *unicast* es más eficiente que si hay muchos usuarios (o en los alrededores de la celda), aquello es más eficiente con el uso de canales *broadcast*.

El 3GPP ha considerado la posible migración de arquitectura RAN hacia una opción favorable. Existen varias propuestas, una de ellas consiste en mover completamente el RNC del NodoB que ya es posible con la arquitectura del Release 99, pero con algunas consideraciones.

Otra de éstas, es la ubicación de las funciones de seguridad en el sitio del NodoB, el cual es normalmente considerado como un sitio remoto y sin garantía. Estas funciones especifican la importancia y confidencialidad que debe tomar para el transporte de las claves criptográficas al NodoB. Esto se hace en el último tramo, el cual necesita estar protegido por algún mecanismo de seguridad, por ejemplo, IPSec. Sin embargo, esto no es suficiente para realizar la conexión segura, como también el equipamiento propio a sus necesidades a las pruebas de manipulaciones, lo que puede ser complejo y costoso. Por lo tanto, si el operador sabe que el NodoB se encuentra en un sitio seguro, entonces él puede implementar una red con NodosB y RNCs que tienen las aplicaciones en el mismo equipamiento físico.

Otra consideración surge con la funcionalidad de RNC al sitio del NodoB, que es la funcionalidad de macro-diversidad necesitada por el enlace de subida de HSPA para obtener una buena capacidad y calidad.

4.3.2 Red de Acceso Radio de LTE.

En el momento de adoptar la arquitectura de un sólo nodo en LTE, la función de la macro-diversidad fue puesto en discusión en el 3GPP. Aunque técnicamente es posible colocar la funcionalidad de macro-diversidad en el nodo que le corresponde a LTE (el eNB o eNB), la necesidad fundamental de ésta fue cuestionada. Muy rápidamente se decidió que la macro-diversidad en el enlace descendente no es necesaria para el tráfico *unicast,* pero con respecto al enlace ascendente, se resolvió que no ofrecía las ganancias para LTE que motiva el aumento de complejidad. Así se llego a la conclusión que la macro-diversidad entre eNBs no es admitida en LTE.

Para el tráfico *broadcast* y *multicast* fue decidido que los eNBs necesitan ser capaces de transmitir el mismo dato en una manera sincronizada, con el fin de apoyar la operación de los servicios MBMS. También las necesidades de movilidad del terminal deben ser consideradas, ya que existen dos consideraciones con la movilidad que requieren atención: garantía para que no se pierdan los datos al cambiar de celda y la reducción del impacto en el núcleo de red al cambiar de celda. Para resolver estás, se acordó que, con un centralizado anclaje en una retransmisión de capa exterior, el eNB haría esto más fácil para la movilidad. Con esto, el 3GPP decidió que la complejidad agregada, al no poseer el anclaje, fue mejor que el requerimiento de un nodo con funcionalidad RAN fuera del eNB.

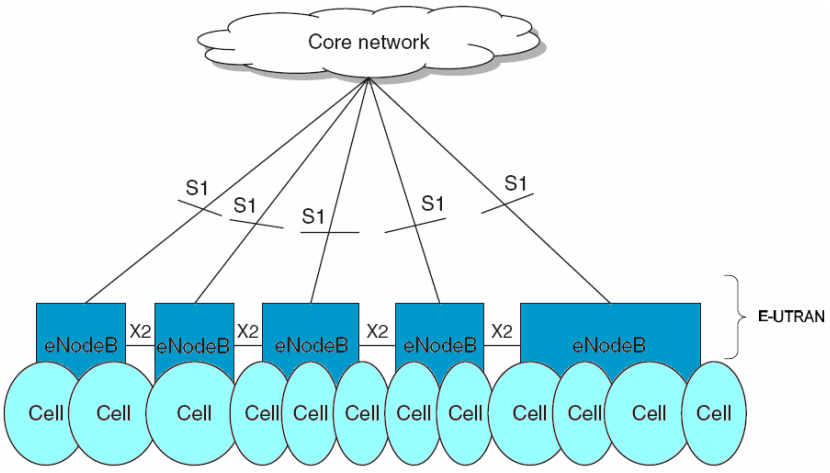

Figura 4.5 *Red de acceso radio LTE: nodos e interfaces.*

En la Figura 4.5 se ve un enfoque general de la red de acceso radio LTE con sus nodos e interfaces. Contrariamente a lo que se vió en la red de acceso radio de WCDMA/HSPA, en LTE sólo se tiene un tipo de nodo, el eNB (E-UTRAN NodoB), por ello, no hay equivalente de un nodo RNC para una red LTE. La principal razón de esto es que no hay soporte para el enlace ascendente o descendente dedicado al tráfico de usuario y la filosofía de diseño de reducir al mínimo el número de nodos.

El eNB está a cargo de un conjunto de celdas que no necesitan estar usando el mismo sitio de antena, de forma similar al NodoB en WCDMA/HSPA. El eNB ha heredado la mayoría de la funcionalidad RNC y es un nodo más complejo que el NodoB. También está a cargo de la única celda de decisiones RRM (*Radio Resource Management*- Gestión de Recursos de Radio), decisiones de *handover* y la programación de los usuarios tanto en el enlace ascendente y descendente. Obviamente, además realiza las funciones de capa física como; la codificación, decodificación, modulación, demodulación, intercalación y organiza los mecanismos de retransmisión (HARQ).

El eNB está conectado al núcleo de red utilizando la interfaz S1, que es similar a la interfaz Iu. También existe una similar a la interfaz Iur de WCDMA/HSPA llamada interfaz X2, ésta conecta cualquier eNB en la red con cualquier otro eNB. Sin embargo, dado que el mecanismo de movilidad para LTE es algo diferente en comparación con WCDMA/HSPA, ya que no es punto de anclaje en la RAN de LTE, la interfaz X2 sólo se utiliza entre eNBs que tienen celdas vecinas y también se utiliza para apoyar la movilidad en modo activo. Esta interfaz además puede ser usada para funciones RRM de múltiples celdas. El plano de control de la interfaz X2 es similar a su contraparte de WCDMA/HSPA, la interfaz Iur, pero carece de apoyo de la funcionalidad DRNC ya que los conceptos de *controlling* y *drift* no existen aquí. En lugar de ello, proporciona soporte a la funcionalidad de reubicación del eNB, realizando por medio de éste, el *handover*. El plano de usuario del X2 se utiliza de apoyo para la menor pérdida de movilidad del reenvío de paquetes. Además los eNBs que están interconectados entre si por la interfaz X2 constituyen la conocida E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*) [17].

Para el tipo de tráfico MBMS, la red de acceso LTE decide si utilizar canales *unicast* o *broadcast* como es en el caso de WCDMA/HSPA. Con respecto a los canales *broadcast*, los incrementos de cobertura y capacidad serán significativos si se utiliza la operación MBSFN (*Multicast Broadcast Single Frequency Network*). A fin de que en los eNBs sea posible enviar los datos simultáneamente, una Entidad de Coordinación MBMS (MCE) sincroniza mediante un reloj global (por ejemplo GPS) las transmisiones de los eNBs y los flujos de datos.

4.4 Arquitectura CN.

Como se menciono antes, el sistema móvil necesita un núcleo de red para realizar las funcionalidades que ello implica. El núcleo de red de WCDMA/HSPA y LTE respectivamente, se basa desde un principio en la evolución del núcleo de red utilizado en GSM/GPRS. El CN utilizado por WCDMA/HSPA está muy cerca del original de GSM/GPRS, en cambio el de LTE, es una evolución más radical del *Core Network* de GSM/GPRS. Es por esto que tiene su propio nombre: *Evolved Packet Core (EPC)*.

4.4.1 Núcleo de Red GSM utilizado por WCDMA/HSPA.

El núcleo de red WCDMA/HSPA se basa en los mismos nodos de la red CN de GSM, aunque la división funcional de ambas tecnologías sea distinta, esto causa el uso de diferente interfaz entre ellas. En WCDMA/HSPA se utiliza la interfaz Iu, mientras que para GSM las interfaces A y Gb.

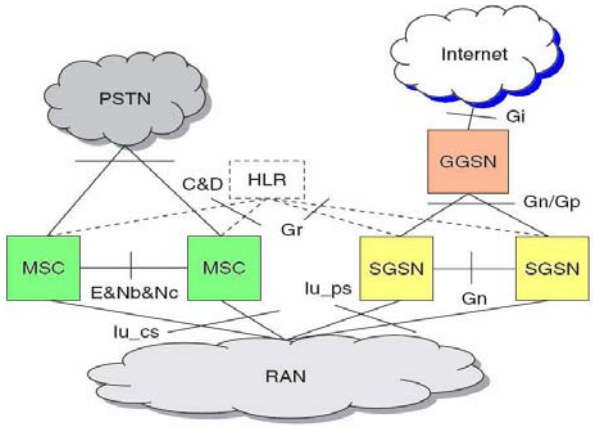

Figura 4.6 *Descripción simplificada del Core Network GSM y WCDMA/HSPA.*

En la Figura 4.6 se muestra una visión general de la arquitectura del núcleo de red utilizado para WCDMA/HSPA. El núcleo red consta de dos dominios distintos:

- El dominio de Conmutación de Circuitos (CS), con el *Mobile Switching Centre* (MSC).
- El dominio de Conmutación de Paquetes (PS), con el *Serving GPRS Support Node* (SGSN) y *Gateway GPRS Support Node* (GGSN).

Como se puede ver también en la figura anterior, la interfaz Iu conecta la red WCDMA/HSPA al MSC a través de la interfaz *Iu_cs* y al SGSN a través de la interfaz *Iu_ps*.

La interfaz Iu_cs se utiliza para conectar el RNC de WCDMA/HSPA al circuito conmutador de dominio del núcleo de red, es decir, al MSC que se utiliza para la conexión llamadas telefónicas a las Redes de Telecomunicaciones Públicas Conmutadas (PSTN). El MSC y el dominio de conmutación de circuito, usan las funciones de los Servicios Integrados de Red Digital (ISDN) como mecanismo de conmutación. Por lo tanto, la señalización para el MSC se basa en la ISDN. La interfaz Iu_ps se utiliza para conectar el RNC al conmutador de paquetes, que es el SGSN y se conecta a un GGSN a través de una interfaz Gn o GP. El GGSN tiene una interfaz Gi que lo conecta hacia la red de paquetes externa (por ejemplo Internet) y hacia al operador del servicio de dominio o al IMS.

Para ambos dominios es común el *Home Location Register* (HLR), que es una base de datos en la red del operador de origen que hace un seguimiento de los abonados de este operador. El HLR contiene información sobre la ubicación actual de la tarjeta del abonado SIM/USIM *(Subscriber Identity Module/*UMTS SIM - Modulo de Identidad del Abonado/UMTS SIM*)*. El HLR está conectado a el MSC a través de la interfaz C&D, y al SGSN a través de la interfaz Gr.

La interfaz Iu apoya una función llamada *Iu flex*. Esta función permite a un RNC conectar a más de un MSC o SGSN y viceversa, es útil para reducir los efectos si uno de los nodos del núcleo de red no está disponible. El mecanismo de *Iu flex* se utiliza para distribuir la conexión del terminal en varios nodos SGSN y MSC, si uno de ellos no esta disponible, el otro mantiene su

tráfico asignado y pueden tomar todas las llamadas entrantes o solicitudes de inicio de sesiones de paquetes (muchas de las llamadas entrantes son esperadas cuando el nodo del núcleo de red no esta disponible, ya que la mayoría de los terminales tratarán de reconectarse cuando ellos se desconecten sin previo aviso).

4.4.1.1 MBMS, Multicast y Broadcast.

El servicio MBMS es usado en el dominio de conmutación de paquetes del núcleo de red. Consecuentemente la interfaz Iu_ps es utilizada para conectarse a la RAN de WCDMA/HSPA. Para el MBMS, el núcleo de red es el que decide si se utiliza la transmisión del portador *broadcast* o *multicast*. En el caso de *broadcast*, el núcleo de red no conoce la identidad de los terminales móviles que reciben la información, mientras que para *multicast* si son conocidos. Así, los terminales no necesitan informar al núcleo de red de sus intenciones cuando se recibe un servicio que utiliza el portador de *broadcast*, mientras que cuando se recibe un servicio que está utilizando un portador de multicast los terminales necesitan informar al núcleo de red sobre estas intenciones.

Por los tanto, la RAN puede decidir si se utiliza transporte de canales *unicast* o *broadcast* en la celda. Esencialmente, la RAN pregunta al usuario que está en una celda, si está interesado en un servicio específico, entonces, si hay una cantidad suficiente de usuarios que se interesa, se selecciona el canal *broadcast* sino, el canal unicast es usado.

4.4.1.2 Roaming.

La funcionalidad del *roaming* en el núcleo de red hace posible que un usuario pueda utilizar la red de otro operador. Ésta es apoyada tanto por los dominios de conmutación de circuitos y de paquetes. En ambos dominios existen diferentes posibilidades, pero en la práctica el tráfico se enruta a través de los operadores de origen GGSN para el dominio PS. Para el dominio CS, el caso común del terminal que origina las llamadas (llamadas salientes) es para hacer el intercambio en la red visitada. Para el terminal que recibe las llamadas (llamadas entrantes), es siempre a través de la red de origen como se ilustra en la Figura 4.7.

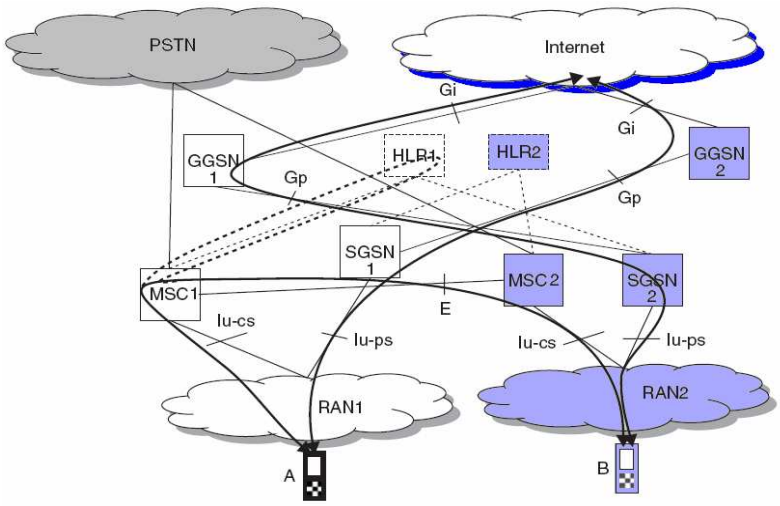

Figura 4.7 *Roaming en GSM y WCDMA/HSPA.*

En la figura se ven dos terminales que pertenecen a dos operadores diferentes (A y B). Los terminales poseen *roaming* en la red de otro operador y ambos tienen conexiones de conmutación de paquetes. Además, el terminal A es llamado por el terminal B a través del dominio de conmutación de circuitos. Las conexiones de conmutación de paquetes son dirigidas desde el SGSN en la red visitada, al GGSN en la red de origen, utilizando la interfaz Gp. Para la llamada de conmutación de circuitos, el terminal A (originario de la llamada) se conecta al MSC de la red visitada. Éste se da cuenta de que el terminal llamado pertenece a su red, y por lo tanto contacta a su HLR que responde con información que el terminal B es atendido mediante el MSC en la red 2. Entonces el MSC1 se contacta con el MSC2, el cual estable una conexión hacia el terminal B.

4.4.1.3 Control de Políticas y de Tarificación.

La función de tarificación es muy importante para el operador que se encuentra en el núcleo de red. Para el dominio de conmutación de circuitos, ésta se realiza en el MSC, mientras que para el dominio de conmutación de paquetes, ésta se maneja bien en el SGSN o bien en el GGSN. Tradicionalmente, se ha hecho posible la tarificación por minutos usados y la tarificación por volumen. El primero es usado para el dominio de conmutación de circuitos mientras que el segundo es más común utilizarlo en el dominio de conmutación de paquetes. Sin embargo, otros

principios de tarificación también son posibles, por ejemplo cuota única con o sin la apertura de las tarifas. Diferentes tarifas se utilizan dependiendo de la subscripción del abonado, y/o si el usuario utiliza *roaming* o no. Con la manipulación de GGSN la tarificación de los servicios de conmutación de paquetes, sistemas de tarificación más avanzados, se hace compatible la tarificación basada en contenido o evento, permitiendo al operador la tarificación de los usuarios finales dependiendo del servicio.

El control de políticas, es una función que es usada en el núcleo de red para controlar la utilización de servicios de conmutación de paquetes, y así se garantiza que el usuario no utilice más ancho de banda del que le es permitido, o que el usuario pueda acceder sólo a servicios o sitos Web aprobados. El control de políticas es efectuado en el GGSN y existe sólo en el dominio de conmutación de paquetes.

4.4.2 El Núcleo de Red SAE: Evolved Packet Core.

Cuando se inició la estandarización de la RAN LTE, se comenzaron los trabajos correspondientes para el CN LTE bajo el *System Architecture Evolution* (SAE). El núcleo de red definido en el sistema SAE es una evolución radical del núcleo de red GSM/GPRS, y por esto es que tiene un nuevo nombre, *Evolved Packet Core* o EPC (Núcleo de Paquetes Evolucionado). El sistema SAE sólo abarca el ámbito de conmutación de paquetes, no el de conmutación de circuitos. Mirando hacia atrás, la filosofía de reducir al mínimo el número de nodos también reina en la normalización del núcleo de red. En consecuencia, la red EPC comenzó como una arquitectura de un solo nodo con todas las funciones en el mismo, excepto el *Home Subscriber Server* (HSS), el cual se mantiene fuera del nodo. El HSS es un nodo de base de datos correspondiente a el HLR del núcleo de red GSM/WCDMA.

En la Figura 4.8 se muestra como el *Evolved Packet Core* se ajusta en el total de la arquitectura. El EPC se conecta a la RAN LTE a través de la interfaz S1, a Internet a través de la interfaz SGi y al HSS vía interfaz S6. S1 es la interfaz entre los eNBs y EPC, que es muy similar a la interfaz Iu_ps. El S1 y el plano de usuario Iu_ps son túneles de transporte basados en IP, que

no conocen el contenido del paquete enviado. Los paquetes IP del usuario final son puestos en el túnel IP S1 por el EPC o el eNB y recuperados en el otro extremo (eNB o EPC).

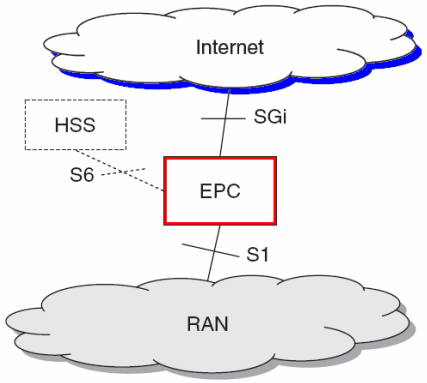

Figura 4.8 *Descripción simplificada del Core Network SAE de LTE.*

Para el plano de control la diferencia entre S1 e Iu no es mucha, de hecho, es sólo en los detalles del establecimiento portador que es visible. La diferencia radica en la forma de indicar la calidad asignada en el servicio del flujo específico de un usuario. Para WCDMA/HSPA se hace por medio de los parámetros de *Radio Access Beared* (RAB) mientras que para LTE se hace por medio de la que apunta a una clase de prioridad específica.

La interfaz S6 mostrada es la que conecta el EPC al HSS. Ésta se trata de una evolución de la interfaz Gr utilizada por WCDMA/HSPA para conectarse al HLR. Por lo tanto, una combinación de HLR/HSS para el Núcleo de Paquetes Evolucionado, puede ser la misma como la representada de GSM en el núcleo de red de WCDMA.

Quizás la mayor diferencia entre WCDMA/HSPA y LTE es el manejo de la movilidad. En LTE, el EPC actúa como un anclaje en el núcleo de red SAE para la movilidad, siendo un nodo EPC que maneja el plano de usuario no cambiado durante una conexión. El EPC toma aquí el papel de un GGSN para GSM/GPRS y WCDMA/HSPA. Debido a la arquitectura plana, éste nodo debe ser capaz de conectarse esencialmente a cada eNB en la red, y actualizarse dentro del mismo, que deberá guiar los paquetes del usuario. Ésta es la gran diferencia en comparación con la RAN WCDMA/HSPA, donde el RNC esconde éste tipo de movilidad desde el núcleo de red.

Tres son las entidades básicas para soportar la movilidad: la MME (*Mobility Management Entity*), el S-GW (*Serving-Gateway*) y el PDN-GW (*Packet Data Network-Gateway*). Por medio de la interfaz S1, éstos se interconectan con la RAN. Dicha interfaz consta del plano de control S1-mme, entre el eNB y el MME, y del plano de usuario S1-u, entre el eNB y el S-GW (ver Figura 4.9).

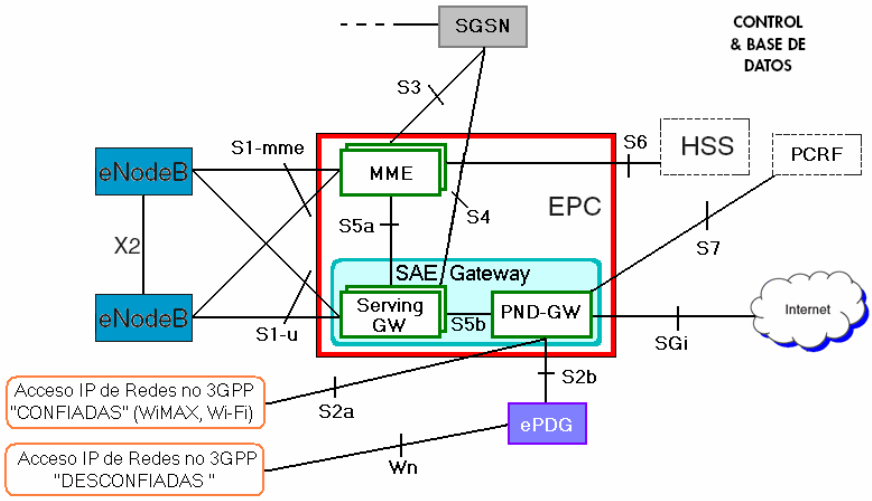

Figura 4.9 *Elementos funcionales e interfaces del EPC.*

4.4.2.1 SAE Gateway.

Está formado por dos entidades lógicas del plano de usuario, el S-GW y el PDN-GW, sirviendo de interfaz entre la red de acceso y las diferentes redes de paquetes. En la práctica ambos *gateways* se pueden implementar como un único elemento de red. El S-Gw se encarga de las siguientes funciones:

- Interviene de forma activa en el proceso de movilidad cuando se produce un traspaso (*handover*) entre eNBs.
- Mediante el interfaz S4, basado en el protocolo GTP (*GPRS Tunneling Protocol*) es la entidad involucrada en el tráfico de usuario en caso de movilidad entre LTE y otra tecnología 3GPP.

- En caso de ser necesario disponer de información del tráfico de usuario ante un requerimiento legislativo, se encarga de replicar dicha información.

El PDN-GW se considera el punto de entrada/salida del tráfico hacia/desde el usuario, proporcionando conectividad hacia el resto de redes externas, destacando las siguientes tareas:

- A través de la interfaz S7 se realiza la transferencia de las políticas de QoS y tarificación que se aplican al tráfico de usuario entre el PCRF (*Policy and Charging Rule Function*) y el PDN-GW.
- Facilita la movilidad transparente y la continuidad en las sesiones de usuario cuando éste se desplaza entre redes de acceso tecnológicamente heterogéneas, es decir, desde una red 3GPP (GSM, WCDMA, HSPA) a otra red que no es 3GPP (WiMAX o Wi-Fi).

Las redes que no forman parte del 3GPP, se distinguen en dos tipos de acceso: Confiado y Desconfiado, y el operador será el que decide el tipo de cada red a quien le permitirá su conexión. La interconexión con una red considerada desconfiada, se realiza empleando un ePDG (*evolved Packet Data Gateway*), que implementa protocolos de movilidad IP, siendo necesario para acceder a los servicios que ofrece el operador. El terminal de usuario establece un túnel IPsec con el ePDG mediante la interfaz Wn. La interconexión con redes de confianza no emplea el ePDG, por lo que se emplean directamente protocolos PMIP con el PDN-GW, mediante el interfaz S2a.

4.4.2.2 MME.

Constituye una entidad del plano de control, encargada únicamente de la señalización, ya que por ella no transitan los paquetes de datos de los usuarios. Mediante la interfaz S3, basada en el protocolo GTP, se realiza el control de señalización para la movilidad con redes 3GGP e interactúa con el HSS (*Home Subscriber Server*), basado en el protocolo *Diameter,* que realiza el proceso de autenticación de los usuarios. Aporta a los operadores la ventaja de aumentar la capacidad de señalización de forma independiente del tráfico de usuario, ya que es un elemento de red dedicado a la señalización y separado funcionalmente de los *gateways*.

4.4.2.3 S1 flex.

Similar a Iu *flex*, *S1 flex* permite un núcleo de red más robusto, con más flexibilidad en la interconexión de los nodos de acceso y del sistema central, rompiendo la habitual red jerárquica. Si uno de los nodos EPC no está disponible, otro nodo puede hacerse cargo de la pérdida del tráfico. Además, la ampliación de la red es más fácil debido a que los nodos EPC se pueden agregar cuando es necesario por la demanda de tráfico y no por un aumento en la cobertura.

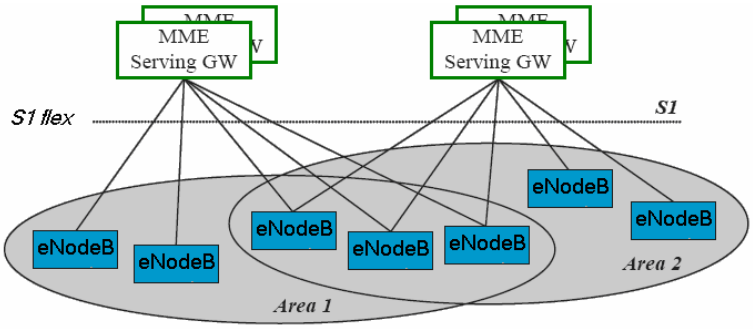

Figura 4.10 *Función S1 flexibility.*

Tal como se ve en la Figura 4.10, *S1 flex* proporciona redundancia y reparto de carga, permitiendo a un eNB estar conectado a más de un nodo MME o *Serving Gateway*. La aplicación *S1 flex* es para ambos de manera independiente.

4.4.2.4 Roaming.

De forma similar a los posibles escenarios considerados en las redes actuales, hay que distinguir dependiendo si el tráfico de usuario se encamina a la red de origen o no. Este último escenario es lo que se conoce como *local breakout*.

En el caso de que el tráfico de usuario se oriente a la red Home, la solución adoptada en SAE pasaría por hacer una separación entre el S-GW y el PDN-GW. El primero, junto con la E-UTRAN y los MMEs, se situaría en la red visitada mientras que el PDN GW, el HSS y el PCRF se situarían en la red de origen.

La interfaz entre el S-GW y el PDN-GW pasaría a ser la interfaz S8 que se basa en el actual punto de referencia Gp existente entre los SGSNs y GGSNs. No obstante aún quedan por definir algunos puntos no resueltos como puede ser la localización del PCRF en la red visitada, así como una posible interacción entre el PCRF de la red de origen y la red visitada.

El escenario *local breakout* es de aplicación en determinadas situaciones en los que el servicio puede ser directamente ofrecido por el operador visitado, ejemplo: se delega en la red del operador visitado el servicio de acceso a Internet. Respecto al escenario anterior, el PDN-GW se situaría en la red visitada, quedando aún por resolver la interacción entre el PCRF de la red de origen y visitada.

4.4.2.5 Control de Políticas y de Tarificación.

En los Release 5 y 6 del 3GPP se definen las primeras arquitecturas para la tarificación y control de QoS por flujo IP. La unificación de estas arquitecturas se finaliza en el Release 7 bajo el nombre de PCC (*Policy and Charging Control*). Esta arquitectura define un nodo, el PCRF, que se encarga de autorizar los servicios o flujos IP a los que accede un usuario, así como el de realizar la provisión de las políticas de tarificación y de QoS en el nodo encargado de ejecutarlas, el PCEF (GGSN en redes GPRS/UMTS).

Otra característica de PCC es la mejora en el modelo de solicitud de la QoS por "*PDP Context",* dándose un paso muy importante a lo que es el control de la QoS, en las nuevas redes de datos, recayendo en el operador y no en el UE.

Un aspecto clave para los operadores, es poder reutilizar a largo plazo toda la arquitectura desplegada para la gestión de políticas en la red y en el terminal, es por esto que, de cara a asegurar una migración suave hacia SAE, se ha tomado como criterio de diseño, la reutilización de las interfaces del PCRF definidos para el Release 7.

4.3.3 WCDMA/HSPA conectado al Evolved Packet Core.

Cuando la tecnología LTE/SAE ha sido introducida en la red, es necesario el *handover* para WCDMA/HSPA, y éste se resuelve conectándose a la red EPC. De hecho, el SGSN del núcleo de red GSM es utilizado para que WCDMA/HSPA sea conectado al EPC, el cual actúa como un GGSN cuando el tráfico es ruteado a través de la RAN de WCDMA/HSPA usando la interfaz S4 (que se basa en la interfaz Gn/Gp utilizada entre GGSN y SGSN), y como un EPC normal cuando el tráfico es ruteado a través de la RAN de LTE. Esto es posible desde un extremo del plano de usuario en el EPC, manteniendo así la dirección IP del terminal. Las partes del plano de control del EPC, no son usadas cuando el terminal está conectado a la RAN de WCDMA/HSPA, en cambio, los protocolos del núcleo de red del SGSN si se utilizan. Con este enfoque, los cambios necesarios son mínimos para el núcleo de red de paquetes utilizado por WCDMA/HSPA, al mismo tiempo debe ser capaz de proporcionar un rápido e ininterrumpido *handover* desde y hacia LTE (Figura 4.11).

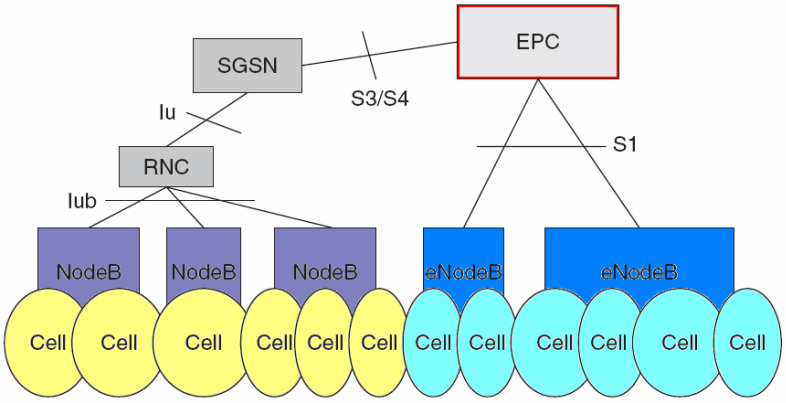

Figura 4.11 *WCDMA/HSPA conectada con LTE/SAE.*

Cuando es necesario el *handover* desde WCDMA/HSPA a LTE, la conexión se hace al EPC por medio del SGSN a través de la interfaz S3 que se basa en la interfaz Gn utilizada entre SGSNs para la reubicación de SGSN. Así, el *handover* está cerca de la reubicación de SGSN con un cambio del plano de usuario en el EPC en lugar de en el GGSN.

4.5 Arquitectura de Protocolos de la Interfaz Radio.

Un panorama general de la arquitectura de protocolos LTE para el enlace descendente se ilustra en la Figura 4.12. Como se hará evidente más adelante, no todas las entidades que se muestran son aplicables a todas las situaciones. Por ejemplo, la programación MAC, HARQ con rápida combinación, no son utilizados para el *broadcast* del sistema de información. Además, la estructura del protocolo LTE relacionada a las transmisiones de enlace ascendente, es similar al descendente en la Figura 4.12, aunque hay diferencias con respecto a la selección del formato de transporte y la transmisión de múltiples antenas.

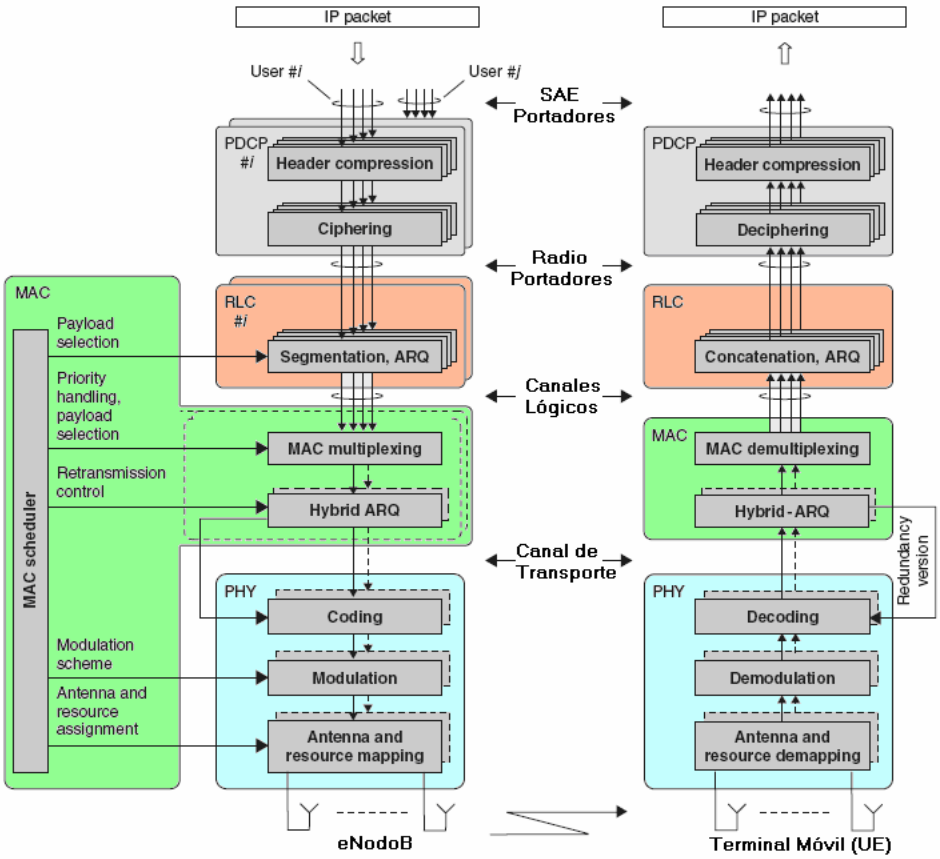

Figura 4.12 *Arquitectura de protocolo LTE.*

Los datos que se transmiten entran como paquetes IP en uno de los portadores SAE. Antes de la transmisión vía interfaz radio, los paquetes IP pasan por las múltiples entidades de protocolo.

4.5.1 RLC: Radio Link Control.

El RLC de LTE es responsable de la segmentación de los paquetes IP, conocidos como unidades de datos de servicio (RLC SDUs), en unidades más pequeñas llamadas unidades de datos del protocolo RLC (RLC PDUs). También se encarga de la retransmisión de los PDUs (*Protocol Data Units*) recibidos erróneamente y por último, asegura la secuencia entregada de los SDUs (*Service Data Units*) a las capas superiores.

El mecanismo de retransmisión RLC proporciona la entrega libre de errores de datos. Para lograr esto, un protocolo de retransmisión opera entre las entidades RLC en el receptor y en el transmisor. Mediante la supervisión de los números de secuencia que se reciben, la recepción de RLC puede identificar los PDUs que faltan. Para cada PDU recibido incorrectamente, el RLC pide una retransmisión la cual se indica y se transmite por medio de informes de estatus. Cuando se configura la retroalimentación, un informe de estatus normalmente contiene información sobre múltiples PDUs y se transmite relativamente con poca frecuencia. Basado en la recepción de reportes de estatus, la entidad RLC en el transmisor puede retransmitir los PDUs desaparecidos si es solicitado. Cuando el RLC está configurado para solicitar la retransmisión, se dice que funciona en el modo AM (Modo Admitido) que es normalmente utilizado para servicios basados en TCP (*Transmission Control Protocol*), en donde la transferencia de datos libres de errores es de interés primordial.

Al igual que en WCDMA/HSPA, el RLC también se puede configurar en modo UM (Modo No admitido) y en modo TM (Modo Transparente). En UM se proporciona la entrega en secuencia a capas superiores, pero no se solicitan las retransmisiones de los PDUs que faltan. UM suele ser utilizado para servicios tales como VoIP, donde la entrega libre de errores es de menos importancia en comparación con la entrega de corto tiempo. El modo TM es sólo utilizado para fines específicos tales como el acceso aleatorio.

A pesar de que el RLC es capaz de manejar errores de transmisión debido al ruido y a impredecibles variaciones del canal, en la mayoría de los casos estos son tratados por el protocolo MAC basado en HARQ.

Además del manejo de la retransmisión y la entrega en secuencia, el RLC también es responsable de la segmentación y concatenación como se ilustra en la Figura 4.13. Dependiendo de la decisión del programador, una cierta cantidad de datos es seleccionada para la transmisión desde el *buffer* RLC SDU, y los SDUs son segmentados/concatenados para crear el RLC PDU. Así, para LTE, el tamaño del RLC PDU varía dinámicamente, mientras que en WCDMA/HSPA antes de la versión 7, se uso un tamaño de PDU semiestático [1]. Por lo tanto, la velocidad de transmisión de datos LTE puede variar desde unos pocos Kbps hasta un valor por muy encima de los cien Mbps, motivando la fácil compatibilidad para LTE. Estos mecanismos de adaptación de velocidad y programación se encuentran en el eNB.

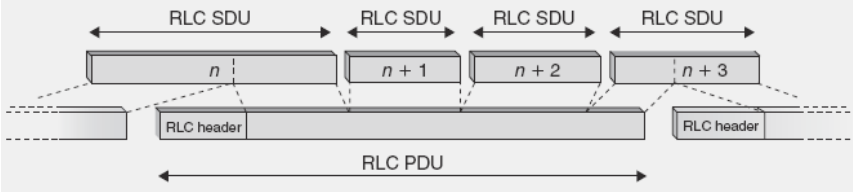

Figura 4.13 *Segmentación y Concatenación RLC.*

4.5.2 MAC: Medium Access Control.

La capa MAC se encarga del canal lógico de multiplexación, retransmisiones HARQ y la programación de ambos enlaces, ascendente y descendente. Esto es definido por medio de una celda de servicio, que es la celda del terminal móvil, que esta conectada a la celda responsable de la operación *scheduling* y HARQ.

4.5.2.1 Canales Lógicos y de Transporte.

La MAC ofrece servicios al RLC en forma de canales lógicos. Un canal lógico es definido mediante el tipo de información que lleva y son generalmente clasificados dentro de los canales de control, usados para la transmisión del control y configuración de información necesaria para la operación del sistema LTE, y los canales de tráfico que son usados para los datos del usuario.

Los tipos de canales lógicos especificados para LTE son:

- *Broadcast Control Channel* (BCCH), es usado para la transmisión del sistema de control de información desde la red hacia todos los terminales móviles de la celda. Antes del acceso del sistema, un terminal móvil necesita leer la información transmitida en el BCCH para averiguar como está configurado el sistema.

- *Paging Control Channel* (PCCH), utilizado para la paginación de los terminales móviles, cuya ubicación en el nivel de celdas no es conocido en la red y el mensaje de paginación, por lo tanto, necesita ser transmitido en varias celdas.

- *Dedicated Control Channel* (DCCH), utilizado para la transmisión del control de información desde/hacia un terminal móvil. Este canal se utiliza para la configuración individual de los terminales móviles, como la entrega de diferentes mensajes.

- *Multicast Control Channel* (MCCH), utilizado para la transmisión del control de información requerida para la recepción del MTCH.

- *Dedicated Traffic Channel* (DTCH), usado para la transmisión bidireccional de datos de usuario a un terminal móvil.

- *Multicast Traffic Channel* (MTCH), utilizado para la transmisión del enlace descendente de los servicios MBMS.

La capa MAC también utiliza los servicios en forma de canales de transporte. Un canal de transporte define cómo y con qué características la información es transmitida por la interfaz radio. Siguiendo la notación de HSPA, que ha sido heredado por LTE, los datos en un canal de transporte se organizan entre bloques de transporte. En cada intervalo de tiempo de transmisión (TTI), a lo más un bloque con un determinado tamaño, es transmitido a través de la interfaz radio. En presencia de multiplexación espacial puede haber hasta dos bloques de transporte por TTI.

Asociado a cada bloque de transporte existe un formato de transporte (TF), especificando como el bloque es transmitido, incluyendo información sobre su tamaño y del sistema de modulación. Variando el formato de transporte, la capa MAC puede realizar diferentes tipos de velocidades de transmisión de datos y por lo tanto llevar a cabo su control.

Los tipos de canales de transporte especificados para LTE son:

- *Broadcast Channel* (BCH), tiene un formato de transporte fijo. Se utiliza para la transmisión de la información sobre el canal lógico BCCH.

- *Paging Channel* (PCH), es utilizado para la transmisión de información de paginación sobre el canal lógico PCCH. El PCH soporta la recepción discontinua (DRX), para permitir al terminal móvil ahorrar energía de la batería cuando se hace la recepción sólo en instantes de tiempos predefinidos [3].

- *Downlink Shared Channel* (DL-SCH), es el canal de transporte utilizado para la transmisión de los datos de bajada en LTE. Soporta características LTE como, la tasa de adaptación dinámica y la programación del canal dependiente. Soporta DRX, reduciendo el consumo de energía del móvil sin dejar de ofrecer una experiencia *always-on*.

- *Multicast Channel* (MCH), se utiliza para apoyar el servicio MBMS. Se caracteriza por el formato de transporte semiestático y programación semiestático. En caso de transmisión multi-celda utilizando MBSFN, la programación y configuración del formato de transporte es coordinado entre las celdas implicadas en la transmisión MBSFN.

- *Uplink Shared Channel* (UL-SCH) es semejante al DL-SCH.

Parte de la función de la MAC, es la multiplexación de los diferentes canales lógicos y el mapeado de los mismos a los canales de transporte apropiados. A diferencia de la MAC en HSDPA, en LTE, la MAC apoya la multiplexación de RLC PDUs desde diferentes portadoras de

radio en el mismo bloque de transporte. Un ejemplo de mapeado de los canales lógicos y de transporte se ve en la Figura 4.14

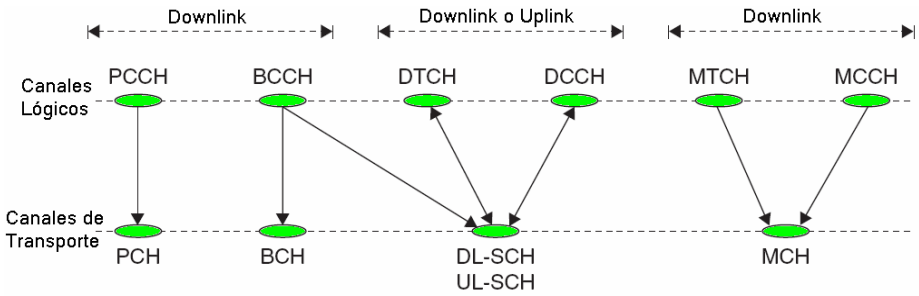

Figura 4.14 *Ejemplo de mapeado de los canales lógicos-transporte.*

4.5.2.2 Programación Downlink y Uplink.

Uno de los principios básicos del acceso radio LTE, es la transmisión del canal compartido en el DL-SCH y UL-SCH, es decir, los recursos de tiempo-frecuencia son dinámicamente compartidos entre los usuarios en ambos enlaces. El programador (*scheluder*), forma parte de la capa MAC y controla la asignación de recursos *uplink* y *downlink*. Ambos recursos son separados en LTE y las decisiones de ellos pueden ser tomadas independientemente.

La función del programador *downlink,* es determinar dinámicamente en cada trama de 1 ms, cuál o cuáles terminales se supone que reciben la transmisión DL-SCH y sobre que recursos lo hacen. En cada trama, se asignan bloques de recursos (unidad basada en tiempo-frecuencia que abarca 180 KHz) a un terminal para la recepción de la transmisión DL-SCH.

El objetivo general del programador es aprovechar las variaciones del canal entre los terminales móviles, y de preferencia las transmisiones hacia terminales móviles sobre recursos con ventajas en las condiciones del canal. Debido a la utilización de OFDM como el sistema de transmisión en el enlace descendente, LTE puede beneficiarse de las variaciones del canal en los dominios de frecuencia y tiempo, mientras que HSDPA sólo puede aprovechar las variaciones en el dominio del tiempo. La información acerca de las condiciones del canal descendente, se realimenta desde el terminal móvil hacia el eNB por medio de informes de calidad del canal. En

suma a la calidad del canal, un alto rendimiento de la programación también debe tomar en cuenta el estado del *buffer* y en las decisiones prioritarias. También es parte del programador la coordinación de interferencia, que trata de controlar la Interferencia Inter-Celda.

La función básica del programador *uplink* es similar al *downlink*, es decir, determina dinámicamente para cada intervalo de 1 ms, cuáles terminales móviles son los que transmiten los datos sobre el UL-SCH, y en qué recursos del enlace ascendente. Para LTE, el enlace ascendente es ortogonal y el recurso compartido es controlado por el programador del eNB. Un recurso asignado no utilizado en su totalidad por un terminal móvil, no puede ser parcialmente utilizado por otro. Por lo tanto, debido al enlace ascendente ortogonal, esto representa menos ganancia al dejar que el terminal móvil seleccione el formato de transporte. Consecuentemente, además de la asignación de los recursos en tiempo-frecuencia al terminal móvil, el eNB también es responsable de controlar el formato de transporte (el tamaño de carga útil y el régimen de modulación) que el terminal móvil utiliza.

4.5.2.3 HARQ.

El protocolo HARQ de LTE es similar al correspondiente protocolo usado en HSPA, en donde se utilizan múltiples procesos paralelos de parada y espera. Sobre la recepción de un bloque de transporte, el receptor hace un intento de decodificar el bloque e informa al emisor acerca del resultado de la operación a través de un único bit ACK/NAK (*Acknowledgement/Negative Acknowledgement*), que indica si la decodificación se ha realizado correctamente o si es obligatorio una retransmisión del bloque de transporte [3]. Para minimizar el *overhead* (cabecera), se usa un único bit ACK/NAK. Para LTE, por otra parte, las capas de protocolo son diseñadas conjuntamente, lo que implica menos restricciones en el diseño.

El mecanismo ARQ, es capaz de corregir la mayoría de errores de transmisión debido al ruido o variaciones imprevisibles del canal. Éste puede ocasionalmente dejar de hacer la entrega libre de errores a los bloques de datos RLC, causando una diferencia en la secuencia de los bloques entregados. Esto suele ocurrir debido a la errónea señalización de retroalimentación, por ejemplo, un NAK es incorrectamente interpretado como un ACK por el transmisor, causando la

pérdida de datos. La probabilidad de que esto suceda puede ser del 1%, un error probablemente demasiado alto para los servicios basados en TCP que requieren prácticamente una entrega libre de errores de paquetes TCP. Más específicamente, para la sostenible velocidad de transmisión de datos superior a 100 Mbps, se requiere que la probabilidad de pérdida de paquetes sea inferior a 10^{-5}. Para mantener un buen desempeño de las altas velocidades de transmisión de datos, el RLC-AM asegurar de manera importante la entrega de datos libre de errores para TCP.

4.5.3 PHY: Physical Layer.

La capa física (PHY) se encarga de la codificación, modulación, procesamiento de la PHY HARQ, procesamiento de múltiples antenas y el mapeado de la señal para los adecuados recursos físicos de tiempo-frecuencia. Todos ellos son dinámicamente controlados por la capa MAC. La capa física también se preocupa del tratamiento del DL-SCH y UL-SCH (ver Figura A2.1), en donde ambos se basan en un proceso similar aunque con algunas restricciones.

Para la difusión del sistema de información en el BCH, un terminal móvil debe ser capaz de recibir este canal de información como uno de los primeros pasos antes de acceder al sistema. En efecto, el formato de transmisión debe ser conocido por los terminales previamente y en este caso, no hay control dinámico de cualquiera de los parámetros de transmisión de la capa MAC.

Para la transmisión de mensajes de paginación en el PCH, puede ser utilizada la adaptación dinámica de los parámetros de transmisión. La MAC puede controlar la modulación, la cantidad de recursos y el mapeado de antena. Sin embargo, como en el caso de un enlace ascendente todavía no se ha establecido cuando un terminal móvil es paginado, el HARQ no puede utilizarse, ya que no hay posibilidad de que el terminal móvil transmita un ACK/NAK.

El MCH se utiliza para las transmisiones MBMS, normalmente con una sola frecuencia de operación en la red, mediante la transmisión de varias celdas en los mismos recursos con el mismo formato al mismo tiempo. Por lo tanto, la planificación de transmisiones MCH deben coordinarse entre las celdas implicadas y no es posible la selección dinámica de los parámetros de transmisión para la MAC.

4.5.4 Estados LTE.

En LTE, un terminal móvil puede estar en varios estados diferentes como se ve en la Figura 4.15. Para el encendido (*power-up*), el móvil entra en el estado LTE_DETACHED y no es conocido por la red. Antes de cualquier comunicación nueva entre el terminal móvil y la red, el terminal necesita registrarse con la red utilizando el procedimiento de acceso aleatorio para entrar en el estado LTE_ACTIVE o LTE_IDLE.

LTE_ACTIVE es utilizado cuando el terminal móvil es activado con la transmisión y recepción de datos. En este estado, el terminal móvil está conectado a una celda específica dentro de la red. Una o varias direcciones IP han sido asignadas al móvil, utilizando el C-RNTI *(Cell Radio-Network Temporary Identifier*). Los subestados IN_SYNC y OUT_OF_SYNC, dependen de si el enlace ascendente se sincroniza a la red o no. Si el enlace ascendente está en el estado IN_SYNC, es posible la transmisión de datos de usuario y el control de señalización. En caso de que no sea así, se tiene lugar dentro de una determinada ventana de tiempo, el momento de alineación no es posible y el enlace se declara OUT-OF-SYNC. En este caso, el terminal móvil necesita realizar un procedimiento de acceso aleatorio para restaurar la sincronización del enlace.

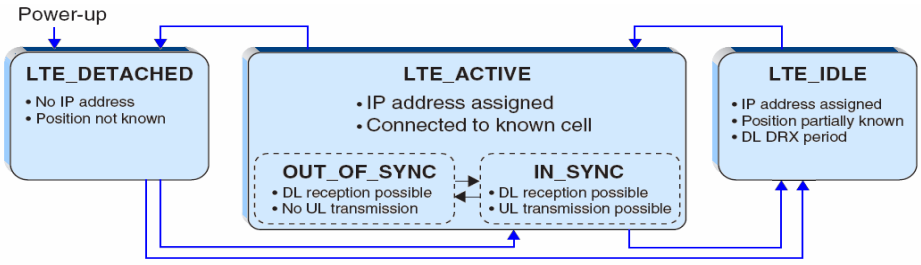

Figura 4.15 *Estados LTE.*

LTE_IDLE es un estado de baja actividad en la que el terminal móvil duerme la mayor parte del tiempo, con el fin de reducir el consumo de batería. La sincronización del enlace ascendente no es mantenida y, por tanto, la única actividad de transmisión que puede tener lugar, es el acceso aleatorio para ir a LTE_ACTIVE. En el enlace descendente el móvil puede periódicamente despertar con el fin de ser paginado para las llamadas entrantes y mantiene su dirección IP con el fin de moverse rápidamente a LTE_ACTIVE cuando sea necesario.

4.5.5 Flujo de datos.

El flujo de datos del enlace descendente a través de todas las capas de protocolo se ilustra en la Figura 4.16, en donde se da un caso con tres paquetes IP, dos en un portador radio y uno en otro portador radio. El flujo de datos en la transmisión ascendente es similar. El PDCP realiza la compresión del encabezado IP, seguida por un cifrado. Una cabecera PDCP se añade, con la información requerida para ser descifrado en el terminal. La salida del PDCP es dirigida al RLC.

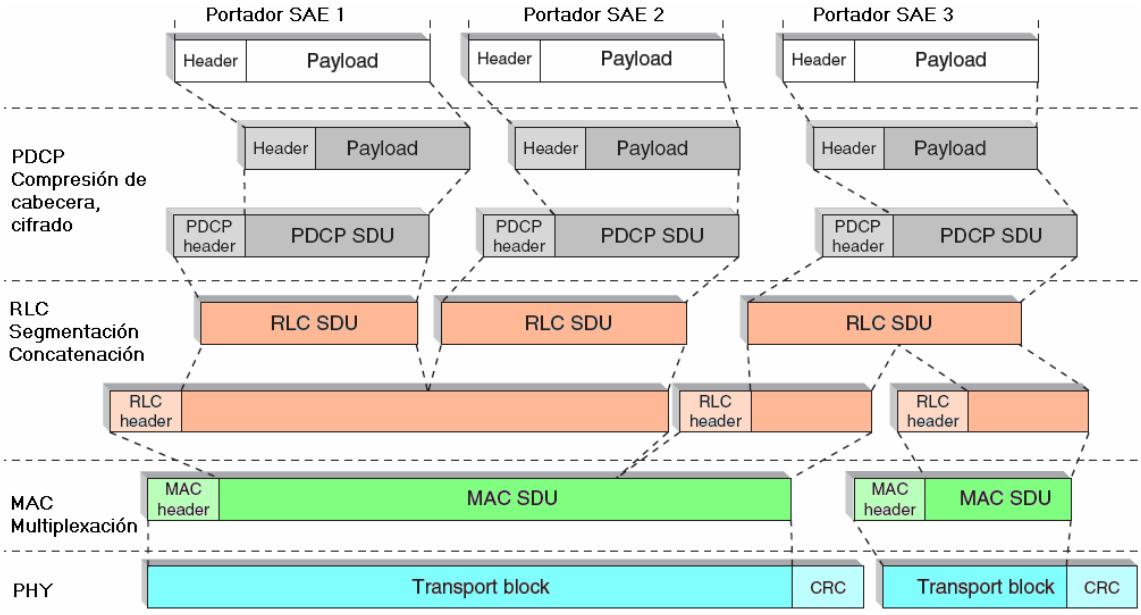

Figura 4.16 *Flujos de datos LTE.*

El protocolo RLC realiza la concatenación y/o segmentación de los PDC PSDUs, y añade una cabecera RLC que se utiliza para la secuencia de entrega (por lógica del canal) en el terminal móvil y para la identificación de los RLC PDUs en caso de retransmisiones. Los RLC PDUs son enviados a la capa MAC, reuniéndolos en un MAC SDU, y atribuyendo la cabecera MAC para formar un bloque de transporte. El tamaño de bloque depende de la tasa instantánea de datos seleccionada por el mecanismo de adaptación de enlace. Así, la adaptación de enlace afecta al proceso de la MAC y el RLC. Por último, la capa física asigna un CRC al bloque de transporte para la detección de errores, realiza la codificación y modulación, y transmite la señal resultante por el aire.

4.5.6 Interfaz Radio.

La arquitectura funcional de los protocolos de la interfaz radio sigue, en líneas generales, el modelo OSI y la estructura especifica de la capa de enlace. La Figura 4.17 muestra la pila de protocolos para el plano de usuario y el plano de control, interactuando con el eNB y el MME.

En el plano de usuario las capas PDCP, RLC y MAC (en la parte del eNB), realizan la compresión de cabecera, cifrado, programación y HARQ.

El plano de control tiene el protocolo NAS (*Network Attached Storage*), que es indicado sólo para la información y es parte de la comunicación entre el UE y el EPC. El PDCP realiza, por ejemplo, cifrado y protección de la integridad, los protocolos RLC y MAC realizan las mismas funciones que en el plano de usuario. El protocolo RRC realiza la difusión, paginación, gestión de conexión, control de portador radio, funciones de movilidad, reporte de medición y control del UE.

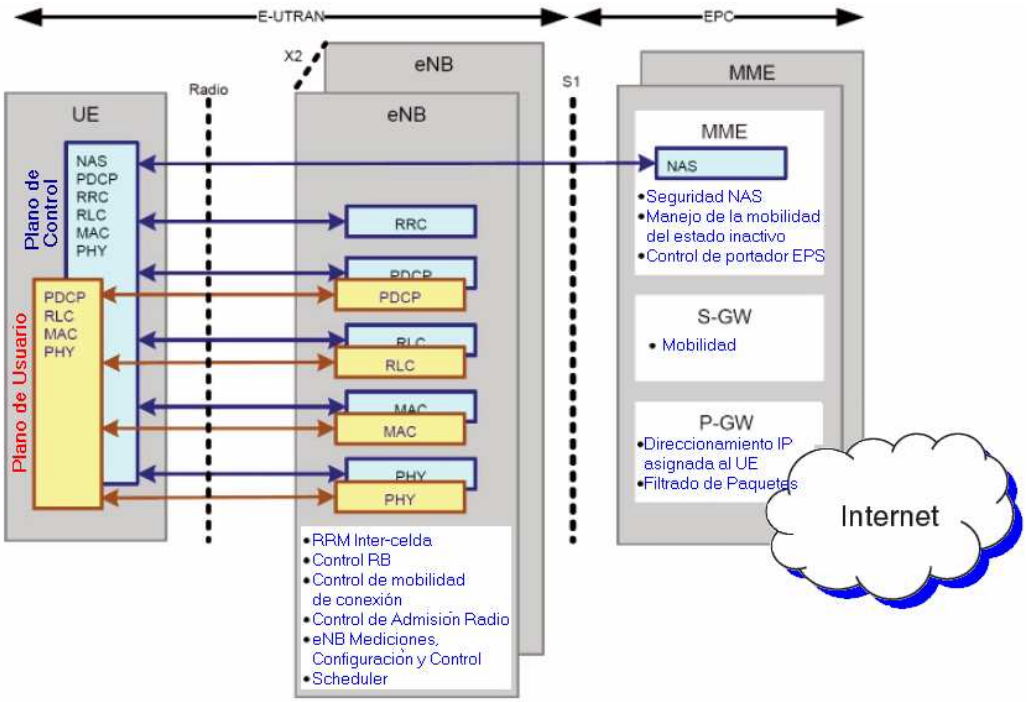

Figura 4.17 *División Funcional entre E-UTRAN y EPC.*

4.6 QoS, Calidad de Servicio.

Aplicaciones tales como VoIP, navegación por la *Web*, video telefonía y video *streaming,* tienen una especial necesidad por QoS. Por lo tanto, una importante función de cualquier red *all-packet* es proveer el mecanismo de QoS para la posible diferenciación de flujos de paquetes basado sobre los requerimientos QoS. En SAE, los flujos de QoS llamados portadores SAE, son establecidos entre el UE y el P-GW como se ve en la Figura 4.18. Un portador radio transporta los paquetes de un portador SAE entre un UE y un eNB. Cada flujo IP es asociado con un distinto portador SAE y la red puede priorizar el tráfico como corresponde. Cuando es recibido un paquete IP desde Internet, el P-GW realiza la clasificación de paquetes basado sobre seguros parámetros predefinidos y enviados en un adecuado portador SAE [2].

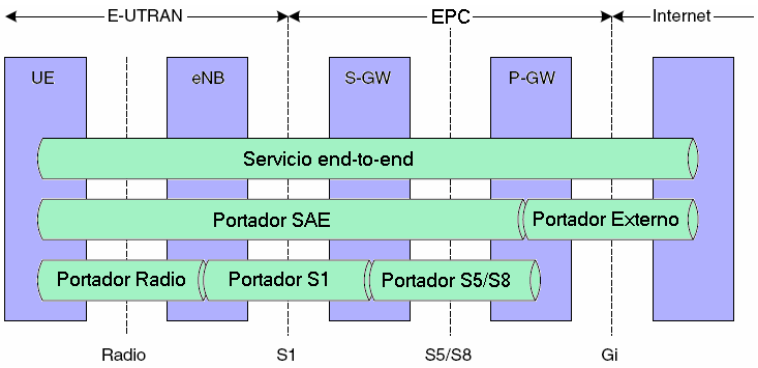

Figura 4.18 *Arquitectura de Servicio de portador SAE.*

Una característica importante es la simplificación en el manejo y caracterización de los parámetros que definen la QoS asociada a cada portador. Aunque actualmente está en definición, parece probable que cada portador SAE se asocie a una etiqueta y a un valor de ARP (*Allocation and Retention Priority*).

La etiqueta es un escalar que define un perfil de QoS. Este perfil definiría las características relativas a pesos de colas, umbrales de admisión, umbrales de gestión de colas y sería configurado por el operador en cada nodo (por ej. eNB).

El ARP determinaría la posibilidad de aceptar una nueva activación o modificación del portador en situaciones de congestión. Además, en situaciones excepcionales de congestión, el ARP podría ser utilizado para determinar los portadores que deben liberarse.

Otro parámetro que define la QoS de cada portador es la velocidad de transmisión requerida. En base a esto se distinguen dos tipos de portador: "GBR" (*Guaranteed Bit Rate*) y "Non-GBR", dependiendo de que requieran o no una velocidad de transmisión garantizada, a fin de apoyar los servicios de *streaming* como IPTV o Radio Internet. Cabe indicar que, la arquitectura de Control de Políticas y Tarificación permite no sólo el control de QoS a nivel de portador, sino que también de forma opcional, el control y ejecución de políticas de QoS por flujo IP.

CAPÍTULO V
DESARROLLO GLOBAL

Este capítulo proporciona una visión general de las actividades e investigaciones sobre LTE, brindando una actualización sobre los resultados publicados hasta ahora y además, el desarrollo que debe tener para su ampliación en el ámbito comercial.

5.1 Antecedentes.

Ahora que los estándares del 3GPP para LTE/SAE funcionalmente se han detenido, se consideran las actividades necesarias para la implementación de la tecnología y prepararla para la extensión comercial: desarrollos de prototipos, pruebas de interoperabilidad y ensayos sobre el terreno. Para garantizar el buen desarrollo de la próxima generación, se ha establecido la iniciativa global llamada LSTI (LTE/SAE *Trial Initiative*), que está formada por los operadores y proveedores de equipos para coordinar las actividades necesarias que deben tener en cuenta al momento de adoptar la tecnología, y la presentación de informes de los avances en estas actividades, con el fin de garantizar que todo el mundo tenga una comprensión realista sobre el rendimiento y la funcionalidad esperada de LTE.

LSTI pretende acelerar la comercialización de LTE/SAE, fomentando la adaptación de la tecnología a través de todos los proveedores participantes. La iniciativa se inauguró oficialmente en mayo del año 2007, por un reducido grupo formado por operadores de red junto con fabricantes de infraestructura de red; Alcatel-Lucent, Ericsson, Nokia, Nokia Siemens Networks, Nortel, Orange, T-Mobile y Vodafone, al que progresivamente se están uniendo más operadores y fabricantes de equipos de medida y terminales (ver Figura A4.1). También se preocupa de los ensayos de la tecnología sobre las actuales implementaciones del estándar. Compara las mediciones de los equipos en el laboratorio, los requisitos de pruebas de campo y los requisitos de los objetivos de ambos organismos NGMN (*Next Generation Mobile Networks*) y 3GPP.

Con el fin de demostrar que LTE/SAE reunirá las expectativas, un número de puntos de prueba se acordaron, en relación con los diferentes aspectos de rendimiento y funcionalidad. Una

actividad de prueba (PoC-*Proof of Concept*) viene junto a los resultados de los prototipos de los proveedores y las pruebas al aire libre para ver si los requisitos técnicos de rendimiento pueden ser obtenidos en ejecuciones precomerciales (ver Figura 5.1). Estas pruebas PoC son:

- Velocidad de transmisión de datos *peak* y eficiencia espectral.
- Velocidad de transmisión de datos esperada para los usuarios finales.
- Pruebas de campo individual y multi-celda.
- Latencia.
- *Handover* y tiempo de interrupción.
- Voz sobre Protocolo de Internet (VoIP) y Calidad de Servicio (QoS) de apoyo.

Figura 5.1 *Pruebas del Proof of Concept de LTE.*

Los objetivos de esta actividad dan una visión realista de cómo LTE/SAE se llevará a cabo, completando esta fase a principios del año 2009.

Sin duda, esta tecnología tiene la aptitud de romper las economías de escalas propias de las redes habituales, ofreciendo crecientes capacidades. En base a esto, el Gobierno de Chile ha optado impulsar a los mercados de telecomunicaciones móviles para que logren el máximo desarrollo, incitando la competitividad del país entre los proveedores como Movistar Chile y Entel Chile. Teniendo la convicción que es posible consolidar la tecnología a través de los futuros concursos de espectro radioeléctrico, y las regulaciones apropiadas que permitan la prestación de los servicios de buena calidad.

5.2 Velocidad de transmisión de datos.

La velocidad de datos de usuario final en todos los sistemas móviles de banda ancha, variará dependiendo sobre la calidad de su enlace radio hasta la estación base, y por encima del número de otros usuarios con los que se comparte la celda. LSTI está buscando alcanzar condiciones óptimas, tanto en las velocidades *peak* como también en las tarifas que pueden esperar los usuarios finales.

5.2.1 Velocidades Peak.

Las metas 3GPP para la velocidad *peak* instantánea de datos son 100 Mbps para el enlace descendente (DL) y 50 Mbps para el enlace ascendente (UL). En el año 2007, el 3GPP realizó simulaciones para el NGMN y concluyó que son posibles las velocidades de 173 Mbps para el DL y 56 Mbps del UL. Esto fue asumido con los 20 MHz de ancho de banda, MIMO 2×2 en el DL y SIMO 1×2 en el UL, y con un terminal limitado para las transmisiones con 16QAM. Desde entonces, se ha aplicado el diseño. En la Figura 5.2 se aprecia un resumen de las velocidades peak de datos medidos por seis diferentes proveedores, tanto en entornos de laboratorio y campo.

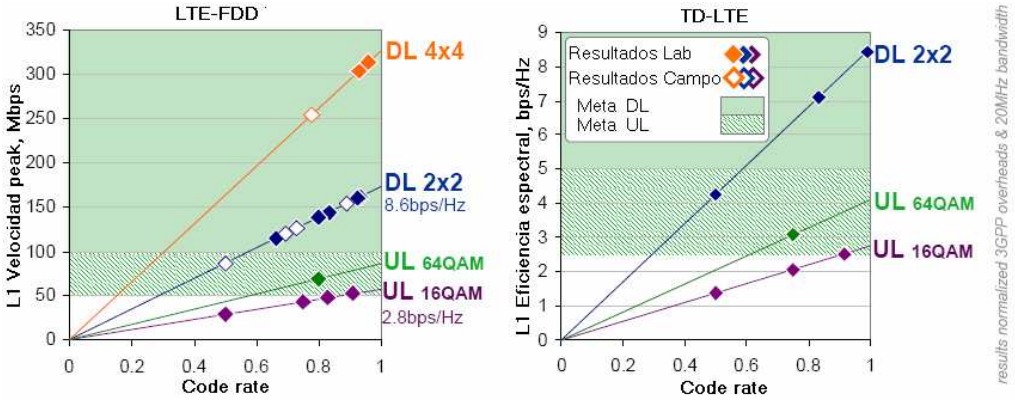

Figura 5.2 *Velocidades peak de los datos medidos en diferentes proveedores LSTI.*

Los resultados medidos incorporados en el canal codificado, permiten un intercambio flexible entre la velocidad de los datos y robustez en errores de bits. Los resultados son asociados en base del "*code rate*" que es la relación de bits de información con los bits transmitidos. La

figura anterior muestra varios resultados, DL encontrando la meta original de 100 Mbps. Con MIMO 4×4, se puede superar una velocidad DL de 300 Mbps. En el UL es más difícil alcanzar el objetivo con 16QAM en terminales disponibles al momento de la prueba, sin embargo, los resultados muestran que se puede lograr. Con 64QAM los terminales también son incluidos en el estándar LTE y en teoría pueden alcanzar hasta 86 Mbps en el UL [32].

¿Qué impactos en las velocidades pueden esperar los usuarios finales? - Hay mucha discusión sobre la relevancia de las velocidades *peak* de transmisión de datos, y si constituyen lo que recibirán en la práctica los usuarios finales. Estas velocidades representan la velocidad máxima de la interfaz aire, realizadas en óptimas condiciones radio y con sólo un usuario conectado a la celda. La razón principal para el uso de éstas, es que son fácilmente verificables con una sencilla base de pruebas de laboratorio. La actual velocidad del usuario final dependerá del número de usuarios que comparten la celda, el tipo de tráfico (navegación por la Web será diferente para vídeo *streaming*), y las condiciones radio de los usuarios. En la práctica es muy difícil especificar una adecuada combinación de tales condiciones, pero así la iniciativa LSTI ha sido capaz de reunir los resultados de las velocidades reales medidas que experimentan los usuarios finales, los cuales se verán afectados por: las condiciones RF, múltiples usuarios en la celda y las cabeceras de aplicación.

5.2.2 Impacto de las condiciones RF: calidad de la señal y velocidad UE.

Las velocidades *peak* se alcanzan en buenas condiciones RF con alta relación señal a ruido, por lo general sólo se experimenta cerca del eNB o estación base. A medida que el UE se aleja del eNB, se reducen las velocidades. La velocidad del UE también reduce el *throughput* debido a las rápidas velocidades de desvanecimiento de múltiple trayectoria. LTE es recomendado para soportar velocidades de hasta 350 Km/h, con una mínima atenuación del desempeño de hasta 120 Km/h. La Figura 5.3a muestra una medida típica de laboratorio de esos efectos de uno de los proveedores LSTI. Los resultados iniciales demuestran que se puede soportar hasta 350 Km/h y se ve muy poco impacto en el rendimiento, con velocidades de hasta 120 Km/h que es sólo el 10% comparado con los 3 Km/h. Resultados de otros proveedores mostraron un rendimiento similar.

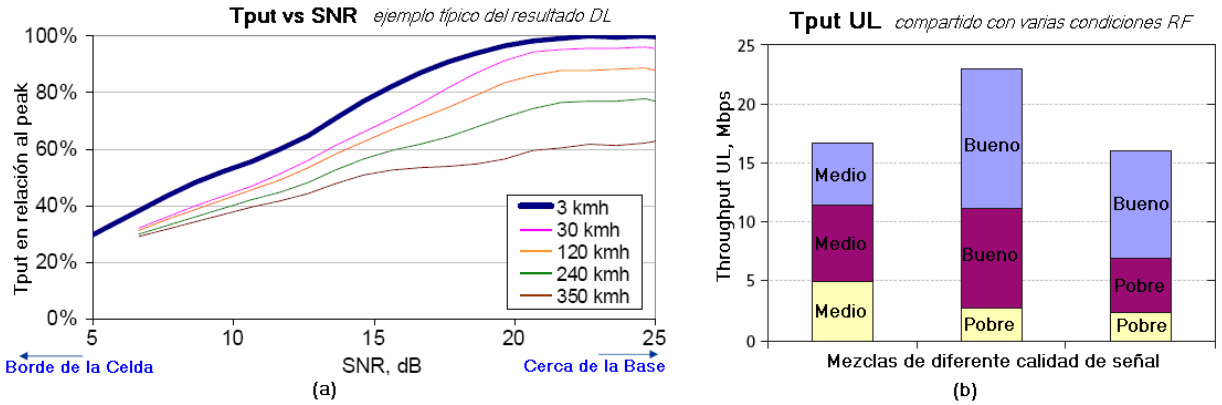

Figura 5.3 *Impactos del Tput sobre le usuario final: Condiciones RF e Intercambio de celda.*

5.2.3 Intercambio throughput de celda entre muchos usuarios.

De la misma manera que el tiempo tomado para ir al trabajo depende de la disponibilidad de las carreteras ocupadas, las velocidades de transmisión de datos para el usuario final de LTE dependerá de como muchas otras personas estén compartiendo la celda. La celda es únicamente compartida entre los usuarios activos que hacen transferencia de datos en ese instante concreto, así compartir con los usuarios que navegan por la Web, puede tener menos impacto que compartir con aquellos que están activamente utilizando video *streaming*.

Los resultados de laboratorio en los canales ideales sin desvanecimiento, muestran que el *throughput* de la celda es simplemente compartido, por lo tanto, si duplicamos el número de usuarios, entonces sus rendimientos individuales se reducen a la mitad. Otras pruebas en canales con desvanecimiento, muestran un incremento de la programación de la frecuencia selectiva, el cual mediante el eNB puede medir y aprovechar las diferencias en el canal UE, para aumentar el *throughput* de la celda (ver Figura 5.4).

Además el enlace ascendente LTE soporta MIMO multi-usuario, el cual puede emparejar los UEs para utilizar el mismo recurso cuando sus señales logran ser "ortogonalizadas" por el eNB. Esta técnica mejora el *throughput* de la celda sin ningún tipo de conocimiento o de procesamiento en la parte del UE.

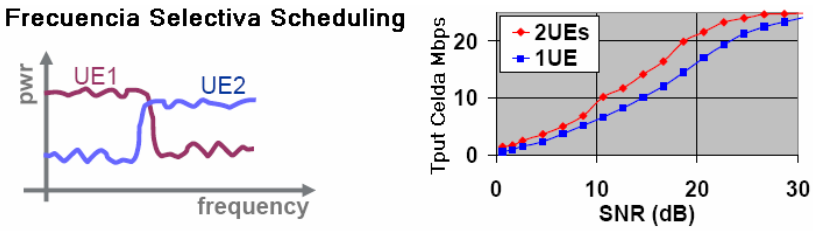

Figura 5.4 *Respuesta de diferentes frecuencias e incremento del Tput.*

5.2.4 Impacto de la cabecera de protocolo sobre el throughput de una aplicación final.

La utilidad *throughput* para una aplicación final puede ser considerada como el *throughput* de capa física (bits de información transmitidos por el aire), menos cualquier retransmisión o cabeceras de paquete añadidas por las capas superiores y por la propia aplicación (ver Figura 5.5).

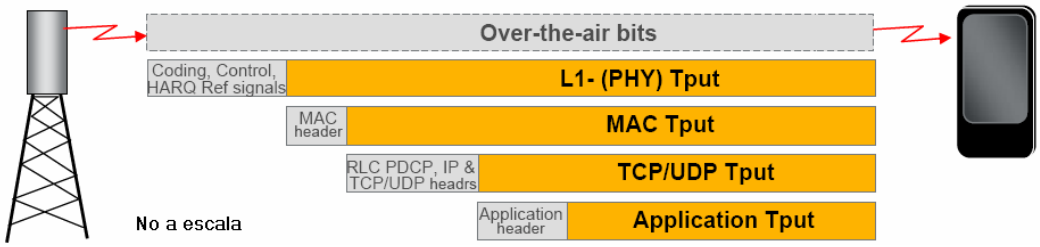

Figura 5.5 *Tput en la capa de aplicación.*

El tamaño de las cabeceras en relación a los datos puede variar, dependiendo del tipo de tráfico transportado. Las transferencias de archivos tienden a utilizar paquetes grandes, por lo que la cabecera es relativamente pequeña. Por el contrario, los paquetes de VoIP tienen pequeños tamaños de carga útil, e incurrirían en mayores cabeceras sin el uso de técnicas como la compresión robusta de cabecera (ROHC). Para dar una visión independiente del tráfico de las capacidades *throughput* LTE, los requisitos de la velocidad de transmisión *peak* son definidos en la capa física, que son los números vistos en la Figura 5.2. El LSTI también ha reunido resultados, comparando las velocidades de transmisión de la capa física con la velocidad de descarga real de las transferencias de archivos. Las diferencias son pequeñas, por lo general menores que el 5 % [30].

5.2.5 Velocidades de Datos del Usuario Final.

Para caracterizar verdaderamente las velocidades de datos del usuario final, se requiere un gran despliegue de una red completamente cargada, decenas de celdas que sirven a cientos de terminales usando aplicaciones prudentes. La iniciativa LSTI está trabajando con otros organismos como el NGMN y el proyecto de investigación *Easy-C,* con el fin de desarrollar nuevos métodos para medir las velocidades representativas de usuario final a partir de un ensayo pequeño. Una clave de esto es generar altos niveles de carga y la interferencia vista durante la "hora punta".

Mientras tanto, los *throughput* medidos en el laboratorio para un sólo usuario por celda, se han extrapolado para predecir el rango de velocidades que pueden ser experimentados, como es mostrado por el área verde en la Figura 5.6.

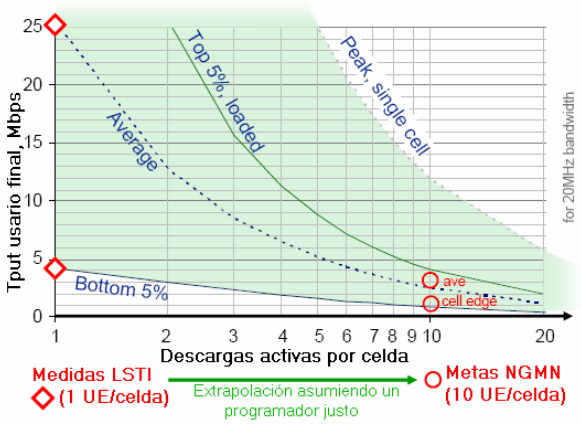

Figura 5.6 *Velocidades de datos esperadas, basadas en mediciones de laboratorio.*

El borde de la celda indica un 5% inferior, el promedio (*average*) y las mejores velocidades del 5% (*top* 5%) están marcados por una red completamente cargada con reutilización de N = 1 (red de frecuencia única). En condiciones de celdas aisladas o sin carga, las velocidades peak pueden ser alcanzadas. Además un "justo" programador es asumido, asignando más recursos espectrales a los usuarios del borde de la celda, a expensas de dar una buena calidad de señal. Estas predicciones basadas en las mediciones LSTI están alineadas en conjunto con las simulaciones de verificación de rendimiento del 3GPP [32], y las metas del NGMN.

5.3 Latencia.

"La velocidad" es sin duda la principal medida en experiencia de la banda ancha. Dos factores influyen en la percepción de velocidad: velocidad de transmisión de datos y latencia. Su relación de importancia depende de lo que el usuario desea hacer. Al descargar un archivo como un MP3 o una película, el tiempo necesario depende mucho de la velocidad de descarga: tamaño/velocidad del dato. También la conexión de tiempo es importante para la mensajería instantánea y/o visualización de páginas Web. Con respecto al *delay* sensible en aplicaciones tales como VoIP o juegos, se requiere que sea menor de extremo a extremo, ya que es esencial para una experiencia interactiva.

Hay dos tipos de objetivos definidos para la latencia de LTE/SAE:

- Latencia del plano de control: tiempo necesario para crear una conexión con un usuario que permita la comunicación.
- Latencia del plano de usuario: tiempo necesario para cada paquete de datos que viaje desde el origen al destino.

5.3.1 Latencia del plano de control.

Para una llamada de voz (concepto de conmutación de circuito), a menudo lleva varios segundos para que la otra parte conteste el teléfono, por lo que unos pocos segundos de retardo en la red que configura la llamada no es particularmente notable. Sin embargo, para la eficiente comunicación por conmutación de paquetes, como navegación por la Web, LTE sólo asigna recursos espectrales a los usuarios cuando lo necesitan, por ejemplo al hacer clic en un enlace. Por lo tanto, los retrasos aquí de incluso un segundo serían muy notables. LTE/SAE ha sido diseñado con un bajísimo tiempo del estado IDLE-ACTIVE, a fin de dar una experiencia *always-on* a un gran número de usuarios sin asignar recursos innecesariamente a los usuarios que no lo necesitan. La Figura 5.7 muestra los resultados medidos por los proveedores LSTI demostrando los tiempos del estado IDLE-ACTIVE dentro del requerimiento de 100 ms definido por el 3GPP.

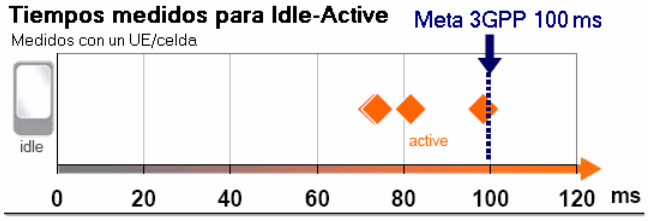

Figura 5.7 *Latencia del plano de control.*

5.3.2 Latencia del plano de usuario.

La latencia del plano de usuario se refiere al tiempo de traslado de cada uno de los paquetes de datos a través de la red. La Figura 5.8 muestra el camino de estos paquetes viajando desde el UE por sobre la interfaz aire hacia la estación base y, a continuación, a través del núcleo de red a un servidor en algún lugar en Internet. En la práctica, el tiempo de latencia puede ser medido por la función *ping* al servidor o al nodo de red. Los requisitos 3GPP y NGMN han sido establecidos tanto como para la interfaz aire y el *delay* de extremo a extremo.

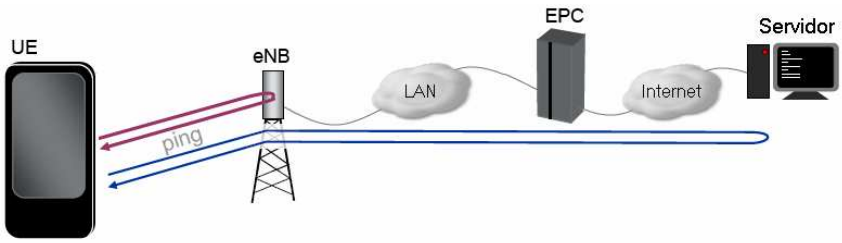

Figura 5.8 *Latencia del plano de usuario.*

5.3.3 Latencia de la interfaz aire.

La interfaz aire se refiere a la conexión radio entre el UE y la estación base. Aquí es importante una comunicación de baja latencia, no sólo por la experiencia del usuario, sino que también para mejorar el rendimiento de los mecanismos de control de lazo cerrado (*closed-loop*). Hay muchos de estos mecanismos en LTE, incluyendo el control de potencia del enlace ascendente, HARQ, programación de frecuencia selectiva y MIMO *Closed-Loop*. En todos ellos, las mediciones realizadas en el receptor son reportadas de vuelta al transmisor, de modo que se

puede adaptar de alguna manera para mejorar el rendimiento en la conexión radio. La baja latencia *feedback* es importante para garantizar las medidas que siguen siendo válidas en el momento en que se puede adaptar el transmisor. Esto se vuelve más importante a altas velocidades de usuario donde las condiciones radio cambian rápidamente.

La latencia en la interfaz aire de LTE, es una importante mejora con respecto a los sistemas anteriores, y ya se ha logrado mediante el rediseño de la interfaz con un corto intervalo de tiempo de transmisión de 1 ms. Este intervalo es el bloque más corto de la señal, que debe ser recibido en su totalidad antes de que pueda ser decodificado. El actual requisito de la latencia en la interfaz aire es de 10 ms ida y vuelta, también se tiene en cuenta el tiempo de procesamiento para codificar y decodificar las transmisiones en cada extremo. La Figura 5.9 muestra las mediciones que demuestran que este requisito de latencia en la interfaz aire puede ser cumplido.

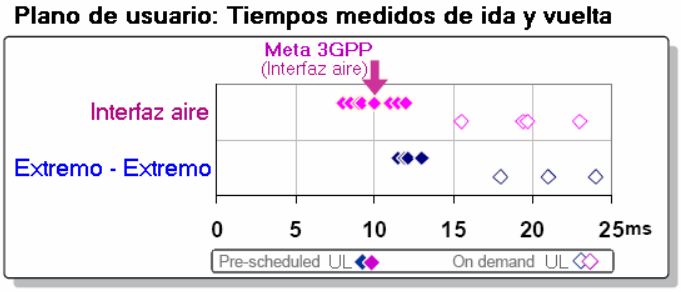

Figura 5.9 *Latencia en la interfaz aire y de extremo a extremo en el plano de usuario.*

5.3.4 Latencia del plano de usuario de extremo a extremo.

La latencia de extremo a extremo representa el tiempo mínimo para enviar un paquete desde un UE a un servidor externo y recibir una respuesta. La Figura 5.8 muestra varias mediciones que cumplen con los 20 ms requeridos por el NGMN como el tiempo de ida y vuelta. Aparte del TTI más corto, el rendimiento de extremo a extremo ha mejorado por la evolución de la red de acceso radio y la arquitectura de núcleo de paquetes, en particular por la eliminación del nodo controlado por la estación base, y la optimización de los procesos del plano portador.

5.3.5 Pre-programación vs. Programación requerida para del recurso UL.

En el mejor de los casos los requisitos de las velocidades de datos *peak*, son definidos para una situación fácilmente comprobable. Para la latencia del plano de usuario, se asume una pre-programación de la programación (*scheduling*) UL, donde el UE pueda transmitir sobre el UL tan pronto como sea necesario. Las latencias medidas de este modo son aplicables a la VoIP, donde hay un patrón regular para las transmisiones UE, y el programador de la BS puede de forma proactiva conceder recursos UL por adelantado. Para los tráficos menos predecibles, como la navegación Web, el UE debe en primer lugar hacer una solicitud de ancho de banda, esperar que sea otorgado por el eNB, y luego transmitir los datos sobre el UL en el tiempo permitido. La LSTI encontró que se agrega en este proceso alrededor de 7 - 12 ms de tiempo de ida y vuelta.

5.4 Soporte QoS y VoIP.

LTE/SAE es basado únicamente en paquetes, red *all-packet* o *all-IP*. Por defecto, todo dato es llevado sobre una base llamada "*best effort*" (traducida como "el mejor esfuerzo") como se muestra en la Figura 5.10, donde el desempeño varia de acuerdo al grado de congestión en la red. Para los servicios tales como la voz o la videoconferencia requieren velocidades invariables de bits y baja latencia de forma constante de extremo a extremo, a pesar de la carga en la celda. LTE soporta un conjunto flexible de capacidades QoS de extremo a extremo, que proporciona la conectividad con garantía de velocidad de bits y latencia.

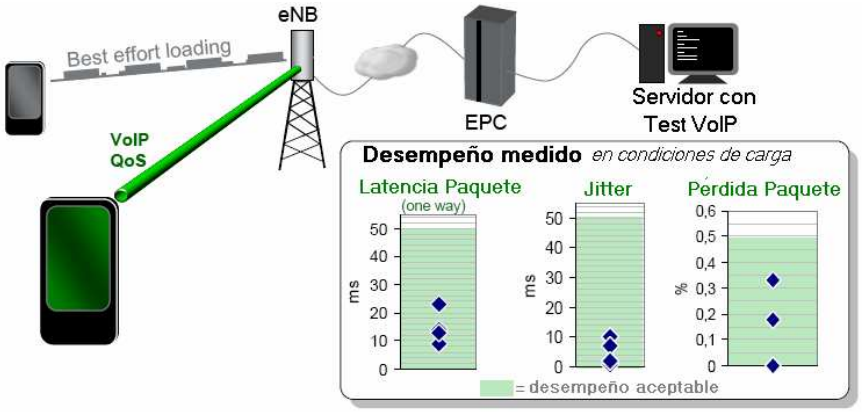

Figura 5.10 *Soporte VoIP, servicio Best effort y pruebas de desempeño.*

Los primeros resultados LSTI mostraron que los servicios *Guaranteed Bit Rate* (Velocidad de Bit Garantizada) pueden ser mantenidos tales como IPTV *streaming*, y no se ven afectados por otros servicios *best effort* tales como transferencias de archivos que pueden ocurrir en la misma celda. Más tarde, las pruebas han demostrado que también el desempeño con respecto al *delay* puede ser garantizado. Las pruebas de laboratorio en condiciones ideales demostraron que LTE/SAE es capaz de proporcionar conectividad IP con el suficiente desempeño en latencia, *jitter*, y pérdida de paquetes para el apoyo de la buena calidad de la VoIP. Los operadores LSTI han confirmado que esto también se puede lograr a través de pruebas manejadas al aire libre, incluso durante el *handover*.

5.5 Handover entre varias celdas.

Mantener una llamada sin problemas mientras un usuario se esta intercambiando de una celda a otra, es uno de los desafíos clave para cualquier sistema celular. El *handover* tiende a ocurrir cuando un usuario se encuentra cerca del borde de la cobertura y, por lo tanto, un malogrado *handover* es a menudo la causa más probable de una llamada perdida. LTE/SAE ya no soporta el *handover* "suave" (*make-before-break*) utilizado en los sistemas WCDMA que requieren de recursos adicionales, tanto en el lado de la comunicación radio y de la red *backhaul*. En cambio es implementado, un *handover* "fuerte" muy rápido (*break-before-make*). La nueva interfaz X2, asiste una conexión directa entre el nodo de origen y el nodo de destino, como se muestra en la Figura 5.11. Esto reduce la carga en el núcleo de paquetes y acelera el proceso, reduciendo la probabilidad de fallas y el resultado de las llamadas perdidas.

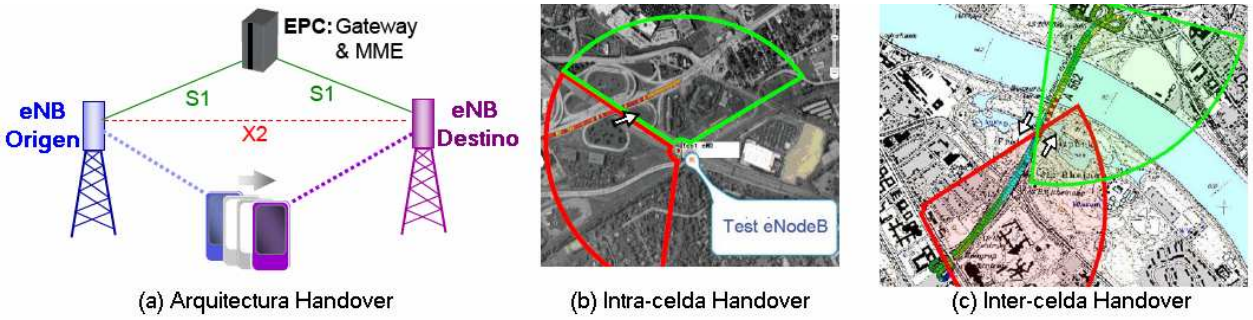

Figura 5.11 *Demostraciones de Handover LSTI.*

Los resultados LSTI han sido consolidados demostrando tanto el *handover* intra-celda (entre los sectores de la misma estación base) y el *handover* inter-celda (entre dos estaciones base diferentes). Estos han sido probados en el campo con velocidades móviles de hasta 120 Km/h. Los tiempos de interrupción de datos cumplen con el requisito de "servicio en tiempo real" del NGMN que es de 300 ms, demostrado con tiempos menores a 50 ms. La interfaz X2 y los procedimientos han manifestado que funcionan bien. En el futuro la actividad IOT (*Inter-Operability Testing*) es quien comprobara que esta interfaz X2 también funciona con diferentes proveedores de eNB en cada extremo.

5.6 Prueba de Interoperabilidad.

La madurez de los estándares puede ser probada mediante las diferentes implementaciones de los proveedores que operan. La LSTI tiene una actividad llamada IOTD (*Inter-Operability Development Testing*), la cual recomienda un conjunto clave de características de la interfaz aire y reporta el progreso de las pruebas. Una segunda fase del IOTD amplía este conjunto y observa otras interfaces que conectan la estación base y el núcleo de red.

Esencialmente, la Prueba de Interoperabilidad (IOT) chequea el equipamiento de los diferentes fabricantes que trabajan juntos. Éste es un método que chequea si los estándares son ciertos y si se han interpretado de la misma manera por todos los fabricantes. Algunas debilidades se pueden resolver y se incluirán en el estándar 3GPP por los miembros, entonces así el IOT indica con éxito que los estándares se encuentran totalmente desarrollados. En esta fase inicial de prueba, no es práctico probar todas las características individuales en el estándar. Por lo tanto, la LSTI ha definido un Conjunto de Características Mínimas con las más importantes, las cuales son testeadas en primer lugar.

El IOT no debe ser confundido con las pruebas aprobadas, ya que primero testea si los estándares son correctos, antes de chequear las pruebas aprobadas que el equipo cumple con el estándar. Estas pruebas no pueden comenzar hasta que el test se haya definido, teniendo que esperar que los estándares estén completos.

5.6.1 IODT.

Los informes IODT sobre las primeras pruebas de proveedores, están por encima de las características esenciales de la interfaz aire. Las pruebas se basarán en equipos conformes con la versión de Marzo del año 2009 de los estándares LTE/SAE. Aquello toma varios meses para implementar la versión más reciente del estándar; la presentación de informes sobre el progreso fue esperado para comenzar a mediados del año 2009. El IODT se centra en la interoperabilidad básica entre los móviles y la infraestructura de un proveedor asociado. La notificación de los resultados se apoyará en un común acuerdo de los procedimientos de prueba.

5.6.2 IOT.

La Prueba de Interoperabilidad continúa en el IODT, pero con un mayor conjunto de características, y claramente probando los múltiples eNB-UE asociados. Además de la interfaz aire, el conjunto de características incluye en el IOT las interfaces S1 y X2 como se muestra en la Figura 5.12. Estas pruebas son requisitos de los eNBs y de los núcleos de paquetes de diferentes proveedores. El objetivo del IOT LSTI pretende estar completo a mediados del año 2010.

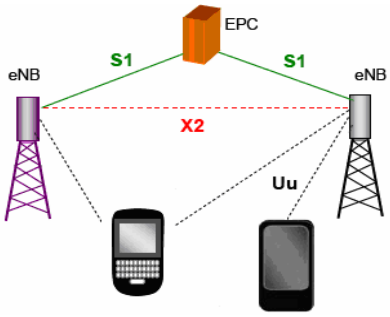

Figura 5.12 *Interfaces analizadas en la Prueba de Interoperabilidad.*

5.7 Ensayos de atención al cliente.

Los ensayos de atención al cliente son la etapa final para probar la tecnología antes de que sea comercialmente implantada. Los usuarios atendidos serán probados en aplicaciones móviles de banda ancha, utilizando terminales precomerciales, conectados a un gran grupo de eNBs y

EPCs del mismo estilo. La LSTI esta actualmente trabajando para definir un conjunto de métodos de ensayos, configuraciones que caracterizarán a los operadores y expectativas claves junto con los casos de experiencia del usuario. Buenos ejemplos de aquello son la capacidad de la celda, y las velocidades de transferencia de datos del usuario final. Como lo ha demostrado el PoC, los resultados serán altamente dependientes de factores tales como las condiciones RF y la carga de la celda, que deben ser evaluados antes del lanzamiento comercial de las redes. Las actividades de prueba LSTI son adaptadas a los requisitos de la NGMN y ayudará a los operadores y proveedores de construir una interpretación realista de lo que es alcanzable. Se espera que los ensayos se realicen desde a mediados del año 2009 hacia adelante, abriendo de esta manera los primeros lanzamientos comerciales en el año 2010 como lo muestra la Figura 5.13.

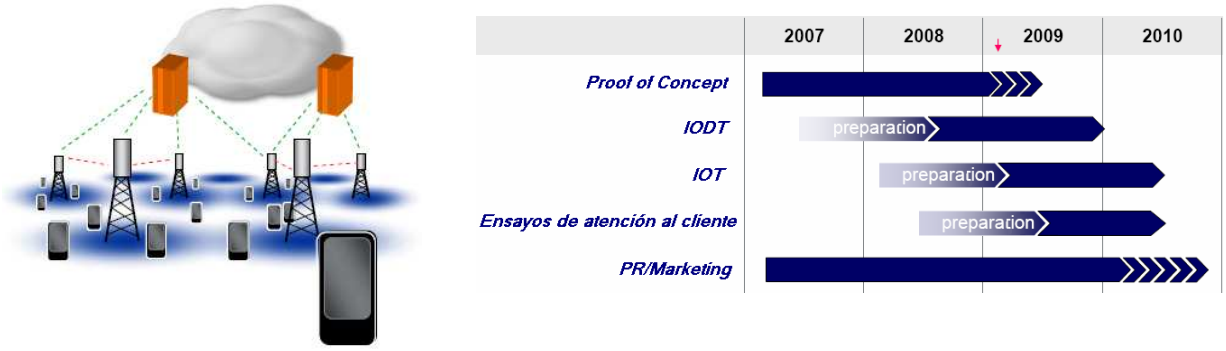

Figura 5.13 *Resumen de la duración de la Actividad LSTI.*

5.8 Desarrollo e implantación de LTE en el mundo.

Los operadores móviles que piensan implantar la tecnología LTE, están en busca de asesoramiento para optimizar y evolucionar sus redes de próxima generación, estructurar los servicios y servir mejor a los mercados claves, y necesitarán respuestas rápidas, ya que se considera que la demanda de ésta es muy fuerte.

Según estudios, se alcanzarán los 136 millones de usuarios LTE hacia el año 2014 [34], creciendo a una velocidad mucho más rápida que los estándares móviles anteriores. Las ventajas para consumidores y empresas en forma de comunicación más rápida, creciente productividad, servicios innovadores y flexibilidad serán claves para la adopción de esta tecnología en el mundo.

El desarrollo de LTE en este momento, ésta siendo respaldado por importantes operadores alrededor del mundo (ver Figura 5.14). En América del Norte por las empresas estadounidenses AT&T y Verizon. En Europa con los operadores de redes móviles T-Mobile, TeliaSonera y Telenor Group. En China y Japón con los operadores SmarTone Vodafone, China Mobile, Ntt Docomo y SoftBank. Por último en Australia con su mayor proveedor de servicios móviles Telstra. La mayoría de estos operadores pretenden lanzar sus redes en el periodo 2010-2011.

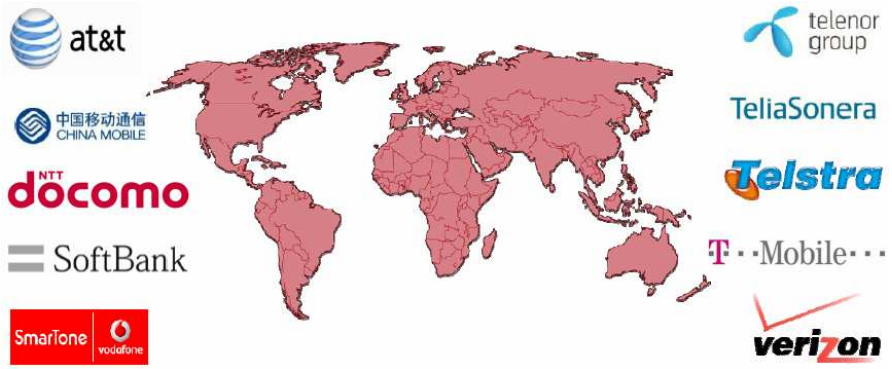

Figura 5.14 *Impulso global de LTE.*

Además empresas proveedoras de equipamiento LTE, han desarrollado redes prototipo para demostrar la tecnología a más operadores para que se unan al proceso de ésta. Como fue en el caso de la empresa Motorola que realizó un tour móvil de LTE en países europeos. Durante el recorrido, los invitados pudieron comprobar el rendimiento de la banda ancha móvil así como una experiencia multimedia en movimiento, en un ambiente urbano por medio de una camioneta con conectividad LTE (ver Figura 5.15). La demostración también incluyó un *handover*, entre sectores y cierto número de aplicaciones de vídeo funcionando con LTE, que requieren un gran ancho de banda, como la televisión en directo por LTE.

Figura 5.15 *Tour móvil comercial de LTE.*

La red LTE fue desplegada y optimizada en sólo 10 días, la cual se constituía por dos eNBs funcionando con hardware comercial, y por los productos de *backhaul* y EPC de Motorola operando en la banda de 2,6 GHz. Dentro de la camioneta, que recorrió con éxito las calles de Barcelona en el Mobile World Congress (Congreso Mundial Móvil 2009) hace unos meses, los visitantes vieron vídeo *streaming* de Alta Definición (HD) desde un servidor de vídeo bajo demanda de Motorola, así como llamadas de voz sobre IP, navegación en la Web, descargas de archivos y otras aplicaciones de Internet de alto ancho de banda y baja latencia [35].

5.8.1 Despliegue de LTE en Chile.

El despliegue de LTE está siendo considerado por las principales empresas de telefonía móvil en el país, debido a las características técnicas favorables que presenta la tecnología.

Movistar Chile realizó la primera demostración de LTE en conjunto con Nokia Siemens Networks, durante el congreso "Conecta 2009" que se realizo en junio del presente año. Entel Chile anunció paralelamente en el evento "Entel Summit 2009", que en los próximos meses hará las primeras pruebas con LTE, de la mano del proveedor sueco de equipamiento Ericcson (Nasdaq: ERIC). Ambas empresas indican que LTE estará disponible en Chile para el año 2011, ya que están a la espera de la aprobación del gobierno, abriéndose una licitación del espectro LTE en el año 2010, por lo que habrá que seguir de cerca hacia adonde apuntan los principales operadores y fabricantes para decidir adecuadamente la sub-banda a instalar.

Por su parte Entel Chile pretende lanzar LTE en la banda de 700 MHz, que es adecuada para tener una mayor cobertura según lo explicó el gerente general corporativo de Entel, Richard Büchi, "*Nuestro interés es hacerlo en la banda de 700 MHz que es la banda americana que dejó libre a cambio de la televisión analógica*" [36]. También aclaró que la compañía estaría interesada en cualquier otra banda que el gobierno pueda licitar, como la banda de los 450 MHz, siempre y cuando exista suficiente *handover* para que no haya interrupciones en la comunicación.

Esta tecnología en Chile se ve destinada a aquellos clientes que gustan de la innovación tecnológica y que tienen la capacidad de pagarla. Pero también apunta a un segmento empresarial

que se verá beneficiado con las posibilidades que se le ofrecen, dependiendo de los servicios que llegue a ofrecer el operador.

5.8.2 Regulación del espectro LTE en Chile.

El regulador de telecomunicaciones, Subtel, espera licitar espectro para redes de LTE antes de fines del año 2009, dentro de las bandas de 700 MHz y 2,6 GHz que se encuentran en este momento despejadas, ya que hay bastante interés por parte de los operadores locales y extranjeros en el proceso. Sin embargo, el desarrollo de esta licitación dependerá del éxito de la actual licitación de los tres bloques de 30 MHz en la banda de 1,7/2,1 GHz, que se realizó el 20 de julio del año 2009, siendo adjudicada por los operadores VTR y Nextel. Entre otros factores se incluye el desarrollo de LTE y la disponibilidad de equipos de esta incipiente tecnología.

De acuerdo con lo dicho por el subsecretario de telecomunicaciones, Pablo Bello, "*Estamos siguiendo las informaciones más actualizadas a nivel internacional con respecto a la disponibilidad de la tecnología, particularmente la disponibilidad de terminales para que este concurso pueda realizarse. Técnicamente, la banda de 2,6 GHz se puede usar tanto para WiMAX como LTE porque se pueden licitar distintos bloques, pero el gobierno pretende usar el espectro para esta última tecnología*" [36].

La regulación es el principal obstáculo para la adopción de LTE en Latinoamérica ya que los países han impuesto límites de espectro a los operadores, por ejemplo, con un máximo de 60 MHz en el caso de Chile y 40 MHz en el caso de Colombia. Aunque el razonamiento detrás de los límites impuestos es válido desde un punto de vista, ya que los reguladores están tratando de que entren nuevos competidores al mercado.

¿Cuánto espectro necesitan los operadores?- La mayoría de los operadores en el mundo están usando entre 40 y 60 MHz. LTE requiere 5, 10 ó 20 MHz por canal e idealmente un mínimo de 10 MHz por canal. Por ello, las empresas de telecomunicaciones tratarán de conseguir cerca de 20 a 40 MHz extra. La asociación de GSM (GSMA) recomienda 100 MHz por operador.

5.9 Servicios y Aplicaciones.

A continuación se describen algunos de los servicios y aplicaciones típicos que se pueden ejecutar en las redes LTE. La mayoría de estos servicios no son específicos de la tecnología misma, ya que han sido adoptados de las tecnologías anteriores, mostrando una mejora en su aplicación. Estos son:

***Push to talk* para celulares:** es muy similar a la conocida comunicación de servicio *walkie-talkie*. Proporciona un servicio de voz uno-a-uno o uno-a-muchos, para un grupo de personas en modo *half duplex*, lo que significa que sólo puede hablar un participante en un momento dado, mientras que los demás están escuchando.

Presencia: el propósito de este servicio, es permitirle a un abonado que tenga su información de presencia disponible para otros usuarios de Servidores de Aplicaciones en la red. Proporciona más información sobre el estado de los abonados, tales como: actividad actual, ubicación, estado de ánimo, zona horaria, dirección de contacto, mensajería instantánea y lista de dispositivos de conectividad a cual se tiene acceso.

Banda ancha inalámbrica: la tecnología LTE proporciona una conexión semejante a la banda ancha tradicional con la ventaja de la movilidad. Con lo que bastará conectar el módem LTE a cualquier tipo de computadora y salir navegando por Internet.

***Broadcast y Multicast*:** este servicio es conocido como MBMS y el beneficio es que varios abonados pueden recibir los mismos datos al mismo tiempo, enviando una sola vez en cada enlace. Tiene un conjunto mucho más amplio de los tipos y aplicaciones, permitiendo la entrega de distintos tipos de datos multimedia. Se compone de dos servicios distintos: *broadcast* y *multicast* (difusión y multidifusión) [4]. Algunos ejemplos de aplicaciones típicas (ver Figura 5.16) adecuadas para MBMS son:

- **Acceso a Internet:** Navegación en la Web más rápida y eficiente. Servicios de búsqueda disponibles en celulares y en los *smartphones* 3G, para encontrar rápidamente enlaces,

sitios, noticias, etc. Además de consultar mapas, descubrir cuál es el mejor camino para llegar a un lugar, o usar servicios de navegación.

- **Descargas de música y videos:** Bajar una canción completa con rapidez o ver un video es una facilidad más de este tipo de tecnología. Con la tecnología LTE descargar una canción o un video toma segundos, mientras que, en las tecnologías anteriores, esto demora algunos minutos.

- **Video llamada y conferencia:** LTE no sólo sirve para transmitir datos, sino que puede usarse en servicios como Skype para mejorar la calidad del audio en las llamadas e incorporar videochat.

- **Juegos Online:** Para jugar en línea, la latencia es fundamental, porque permite mantener el juego fluido. LTE reduce estos tiempos de espera a casi cero, permitiendo jugar de forma instantánea.

- **Televisión Online:** La mayor velocidad de este servicio permitirá tener servicios de video streaming, sino que también estos se verán en alta definición y se podrán recibir en vivo.

- **M-Comercio:** Móvil Comercio es un servicio dedicado a la transacción electrónica a través del teléfono móvil. Permite a las empresas ampliar su alcance en el mercado, ofrecer un mejor servicio y reducir los costos.

Figura 5.16 *Aplicaciones MBMS.*

5.10 Ventajas y Desventajas.

Según lo analizado dentro de este capítulo, el gran potencial del despliegue de la tecnología LTE se reflejaría por las siguientes ventajas:

- LTE impulsará las capacidades de los operadores de la red, permitiéndoles proporcionar una banda ancha móvil más rápida a más usuarios, con lo que revolucionarán el mercado de las telecomunicaciones móviles.

- LTE podría llevar la banda ancha móvil a las regiones menos pobladas y contribuir a la reducción de la brecha digital que existe entre las zonas rurales y urbanas.

- LTE utiliza el espectro radioeléctrico con más eficacia, permitiendo a las redes móviles sacar ventaja del "dividendo digital" y usar las frecuencias liberadas por el paso de la televisión analógica a la digital.

- Las señales con LTE viajarán más lejos que con la tecnología GSM, y realmente se reducirá el número de antenas necesarias para lograr la misma cobertura de la red, con lo que se preservarán los paisajes y disminuirá el consumo de energía.

- LTE ofrecerá a través de sus redes, grandes prestaciones con velocidades *peak* y menores latencias en cargas y descargas. Ello permitirá que los proveedores de servicios ofrezcan velocidades más altas de datos, suministren mayores tolerancias de ajuste de tráfico, incrementen la adopción de servicios de datos móviles y mejoren márgenes e ingresos promedios por usuario (ARPU).

- LTE es totalmente compatible en sentido reverso con las tecnologías GSM/GPRS/EDGE, UMTS (WCDMA), HSPA y CDMA2000, apoyando también la movilidad entre redes heterogéneas no relacionadas al 3GPP, por ejemplo; WLAN, WiMAX.

- LTE utiliza OFDM para manejar elegantemente los problemas de la interferencia intersímbolo producida por el multi-paso, y simplifica enormemente la ecualización del canal. Siendo ligeramente más óptimo que los sistemas CDMA.

Con respecto a las desventajas, estas podrían ser generadas en base a:

- Los costos de la tecnología seguramente serán un tanto elevados en un comienzo, debido a las licitaciones del nuevo espectro LTE, renovación de equipo, costos de mantenimiento y costos operativos (ventas, marketing, sistemas de gestión de clientes, etc.), aunque esto se solucionará por medio de economías a escala.

- El tiempo de puesta en marcha de la tecnología. Esto podría generar, si es prolongado, algunas dudas sobre la factibilidad de la tecnología, ya que no se fue consecuente con las fechas reales de implementación.

- La competencia con otras tecnologías de banda ancha móvil, como WiMAX. Además de la variada oferta de tecnologías de banda ancha por cable módem o fibra, como el ADSL, ya que cada vez esta tecnología está ofreciendo mayores velocidades a los usuarios, entonces, si un operador va a competir con esta tecnología, su oferta deberá ser mucho más atractiva para el usuario final.

- A causa de que los nuevos servicios desplegados harán necesario que el uso del espectro sea el más eficiente posible, el actual espectro no será suficiente para la demanda futura, ya que los operadores nacionales tienen en su poder un espectro limitado y por debajo de lo recomendado por la GSMA.

CONCLUSIONES

Se han estudiado en profundidad los requerimientos y necesidades de la tecnología inalámbrica LTE, centrando el estudio en la comparación de ésta con otras tecnologías 3G, estructura necesaria para el despliegue de sus redes, técnicas de acceso al medio, implementación dentro del ámbito comercial e identificación de posibles ventajas y desventajas en su desarrollo futuro. Ayudando en el conocimiento de una tecnología emergente que aún no esta presente en nuestro país, lo cual es de suma importancia para estar a la vanguardia en el área de las telecomunicaciones.

Las tecnologías 3G que han sido desarrolladas por los distintos organismos de estandarización, presentan una gran cantidad de características comunes, ya que abordan el mismo tipo de aplicación y operan bajo las mismas las condiciones y escenarios. Sin embargo, LTE se distingue de las demás por su mejora en las tasas de transferencias, latencia, velocidad de usuario, movilidad, cobertura, difusión multicast y flexibilidad en la asignación del espectro. Con esto, la tecnología responde al salto tecnológico que se requiere, apurando el desarrollo de un nuevo sistema, con mayor velocidad y utilizando la mayor cantidad de infraestructura existente, abriéndose de manera importante el camino hacia la 4G de telecomunicaciones móviles.

La reingeniería del núcleo de paquetes de las redes móviles existentes, ha sido motivada por el rápido crecimiento del tráfico de datos IP tanto como la aparición de nuevas tecnologías celulares que permiten aumentar considerablemente las velocidades de transmisión de datos en estas redes. SAE es la respuesta de los proveedores y operadores participantes en el 3GPP a esta necesidad y otras más como el soporte de configuraciones de red, el alto nivel de disponibilidad del servicio y la reducción del número de nodos, esperando que esta arquitectura nueva asegure la competitividad de las tecnologías móviles durante la próxima década. Sin embargo, la introducción de mejoras en el corto plazo tales como control de QoS y la redefinición del plano de usuario, permitirán que la migración a SAE sea lo más dócil posible.

La infraestructura LTE esta diseñada para ser tan simple como sea posible de implementar y operar, por poseer la característica de ser una tecnología flexible, ya que se puede desplegar en

una amplia variedad de bandas de frecuencias, ofreciendo anchos de banda escalable de menos 5 MHz hasta 20 MHz, junto con el soporte de ambos espectros, FDD y TDD.

La interfaz aérea cada vez posee características más sofisticadas, apoyadas en algoritmos complejos con el fin de optimizar el rendimiento, la eficiencia y el rango de funcionamiento. OFDMA se ha convertido en la técnica de acceso para la próxima generación inalámbrica, por ofrecer una transmisión de datos robusta con mejor eficiencia espectral. LTE consigue mejorar esto utilizando esquemas como SC-FDMA, el que favorece las características de la señal, debido a que estas presentan menores factores de cresta que las señales OFDMA y ello redunda en un simple desarrollo de la etapa amplificadora de los móviles. Este enfoque empleado en LTE supera las capacidades de cualquier otro sistema que utiliza OFDMA, ya que además se apoya en la técnica basada en múltiples antenas, que busca reducir la correlación entre las señales recibidas manejando diferentes modos de diversidad, suministrando la tecnología inalámbrica de área amplia más potente que se haya desarrollado.

Los organismos reguladores deben desempeñar un papel de "promotor/facilitador" sobre el acceso a las tecnologías innovadoras como LTE, y considerar las medidas para estimular el crecimiento de la banda ancha móvil en los mercados de América Latina, suprimiendo los obstáculos de ingreso a estos, y así poder garantizar el beneficio tecnológico para toda la población.

La demanda de acceso a Internet de banda ancha, es el servicio con una mayor tasa de crecimiento. En este momento, las redes fijas ADSL y Cable Módem sólo están satisfaciendo las zonas más densamente pobladas y constituyen en Chile un duopolio, presentando costos muy altos para el ancho de banda ofrecido, llegando a una penetración de un 33% de los hogares chilenos conectados a Internet. Para que este desafío sea positivo en la oferta de servicios de banda ancha, la nueva tecnología móvil LTE, que se implementará sobre las redes de telefonía móvil actualmente existentes, se presenta como una herramienta eficaz y factible para incrementar el acceso a Internet e introducir una competencia en el mercado de las telecomunicaciones.

LTE tiene a su favor que tanto en la fase de estandarización como en la de posterior despliegue está siendo apoyada por; proveedores de equipos, institutos de investigación, operadores y por presentar una gran ventaja a nivel técnico sobre otras potenciales tecnologías como WiMAX, ya que LTE tiene como base los cimientos de su antecesora UMTS siendo prácticamente una actualización de software con parte de los costos del capital ya facilitados, a diferencia de WiMAX que debe implementar su red de forma completa requiriendo una inversión que parte de cero.

Con el paso de la televisión analógica a la digital, una gran gama de frecuencias estará disponible para el posible uso de la tecnología LTE, no limitándolo a las bandas conocidas en que se espera su despliegue en Chile, como las bandas de 700 MHz y 2,6 GHz. Esto dará cabida a que la futura implementación de LTE entre de lleno con mayores alternativas de bandas y utilizando el espectro radioeléctrico con más eficiencia.

En definitiva, LTE es la evolución natural de los actuales sistemas de telecomunicaciones móviles que demanda la sociedad de la información en su continuo avance, tanto para los usuarios finales como para los fabricantes y suministradores de tecnología, operadores de telecomunicaciones y empresas del sector.

ANEXO I
RECOMENDACIONES UIT-R

Las Recomendaciones UIT-R, constituyen una serie de normas técnicas internacionales desarrolladas por el Sector de Radiocomunicaciones (ex CCIR) de la UIT. 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.

Una lista de las Recomendaciones UIT-R sobre las IMT-2000 se aprecia en la Tabla A1.1, en donde se especifica el número de la recomendación y el título que lleva.

Recomendación número	Título
M-687	Telecomunicaciones Móviles Internacionales IMT-2000.
M-816	Marco para servicios que prestarán las IMT-2000.
M-817	Arquitecturas de red para IMT-2000.
M-818	Funcionamiento por satélite de las IMT-2000.
M-819	IMT-2000 para los países en desarrollo.
M-1034	Requisitos de las interfaces radioeléctricas para IMT-2000.
M-1035	Marco general para el estudio de las interfaces radioeléctricas y del subsistema de radio en las IMT-2000.
M-1036	Disposiciones de frecuencias para la implementación de IMT-2000 en las bandas 806-960MHz, 1.710-2025MHz, 2110-2200MHz y 2500-2690MHz.
M-1078	Principios de seguridad para las IMT-2000.
M-1079	Requisitos relativos a la calidad de funcionamiento y servicio en las redes de acceso a IMT-2000.
M-1168	Marco general para la gestión de las IMT-2000.
M-1182	Integración de los sistemas móviles terrenales y por satélite.
M-1223	Evaluación de los mecanismos de seguridad para las IMT-2000.
M-1224	Vocabulario de términos de las IMT-2000.
M-1225	Pautas de evaluación de las tecnologías de transmisión radio para IMT-2000.
M-1308	Evolución de los Sistemas Móviles Terrestres hacia las IMT-2000.
M-1311	Marco para la modularidad y los elementos radio comunes para las IMT-2000.
M-1390	Metodología para el cálculo de las necesidades de espectro terrenal de las IMT-2000.
M-1455	Características mínimas de calidad y condiciones de funcionamiento para las estaciones en plataformas a gran altitud que proporcionan IMT-2000 en las bandas 1885-1980MHz, 2010-2025MHz y 2110-2170MHz en las Regiones 1 y 3 y 1885-1980MHz y 2110-2160MHz en la Región 2.
M-1457	Especificaciones detalladas de las interfaces radio de las IMT-2000.

M-1545	Incertidumbre de medición aplicada a límites de prueba para el componente terrenal de las IMT-2000.
M-1579	Circulación a nivel mundial de los terminales IMT-2000.
M-1580	Características de las emisiones no deseadas procedentes de estaciones de base que utilizan las interfaces radio terrenales de las IMT-2000.
M-1581	Características de las emisiones no deseadas procedentes de estaciones móviles que utilizan las interfaces radio terrenales de las IMT-2000.
M-1635	Metodología general para evaluar la interferencia potencial entre sistemas IMT-2000 o posteriores.
M-1641	Metodología de evaluación de interferencia cocanal para determinar la distancia de separación entre un sistema que utiliza estaciones situada en plataformas a gran altitud y un sistema celular para la provisión de servicios IMT-2000.
M-1645	Marco y objetivos generales del desarrollo fututo de las IMT-2000 y sistemas posteriores.
M-1646	Parámetros que deben utilizarse en los estudios de compartición de frecuencias y del umbral de df entre las IMT-2000 terrenales y SRS(sonora) en la banda 2630-2655MHz.
M-1654	Metodología para el calculo de la interferencia causada por el servicio de radiodifusión por satélite(sonora) a los sistemas IMT-2000 terrenales que utilizaran la banda 2630-2655MHz.
M-1768	Metodología de cálculo de las necesidades de espectro para el fututo desarrollo del componente terrenal de IMT-2000 y sistemas posteriores.

Tabla A1.1 *Recomendaciones UIT-R de las IMT-2000.*

ANEXO II

PHY: Physical Layer

Una visión simplificada del proceso para el DL-SCH se da en la Figura A2.1a. Los bloques de la capa física son controlados dinámicamente por la capa MAC que se muestra en color gris, mientras que la configuración semi-estática de los bloques de la capa física se muestra en color blanco. Cuando un terminal móvil es programado durante un TTI en el DL-SCH, la capa física recibe un bloque de transporte de datos a transmitir (dos bloques de transporte en caso de multiplexado espacial). Para cada bloque de transporte, se adjunta un CRC y cada uno de esos CRC adjuntados transporta un bloque que es codificado por separado. La codificación de velocidad del canal, necesariamente es incluida la velocidad en juego, que se determina implícitamente mediante el tamaño del bloque de transporte, el sistema de modulación, y la cantidad de recursos asignados para la transmisión. Todas estas cantidades son seleccionadas por el programador del enlace descendente. El uso de la redundancia está controlado por el protocolo HARQ y afecta al proceso de la velocidad en juego, para generar el conjunto correcto de bits codificados. Por último, en el caso de multiplexado espacial, el mapeo de la antena también está bajo el control del programador del enlace descendente.

El terminal móvil programado, recibe la señal transmitida y realiza el proceso reverso de la capa física. La capa física en el terminal móvil, también informa al protocolo HARQ si la transmisión fue decodificada con éxito o no. Esta información es utilizada por la parte del HARQ en la MAC, funcionalmente en el terminal móvil para determinar si se trata de una retransmisión solicitada o no.

El proceso del UL-SCH en la capa física sigue de cerca el proceso del DL-SCH. Sin embargo, notese que el programador en el eNodoB es responsable por la selección del formato de transporte del terminal movil y los recursos que se utilizarán para la transmisión del enlace ascendente. El proceso del UL-SCH en la capa física se muestra, en forma simplificada, en la Figura A2.1b.

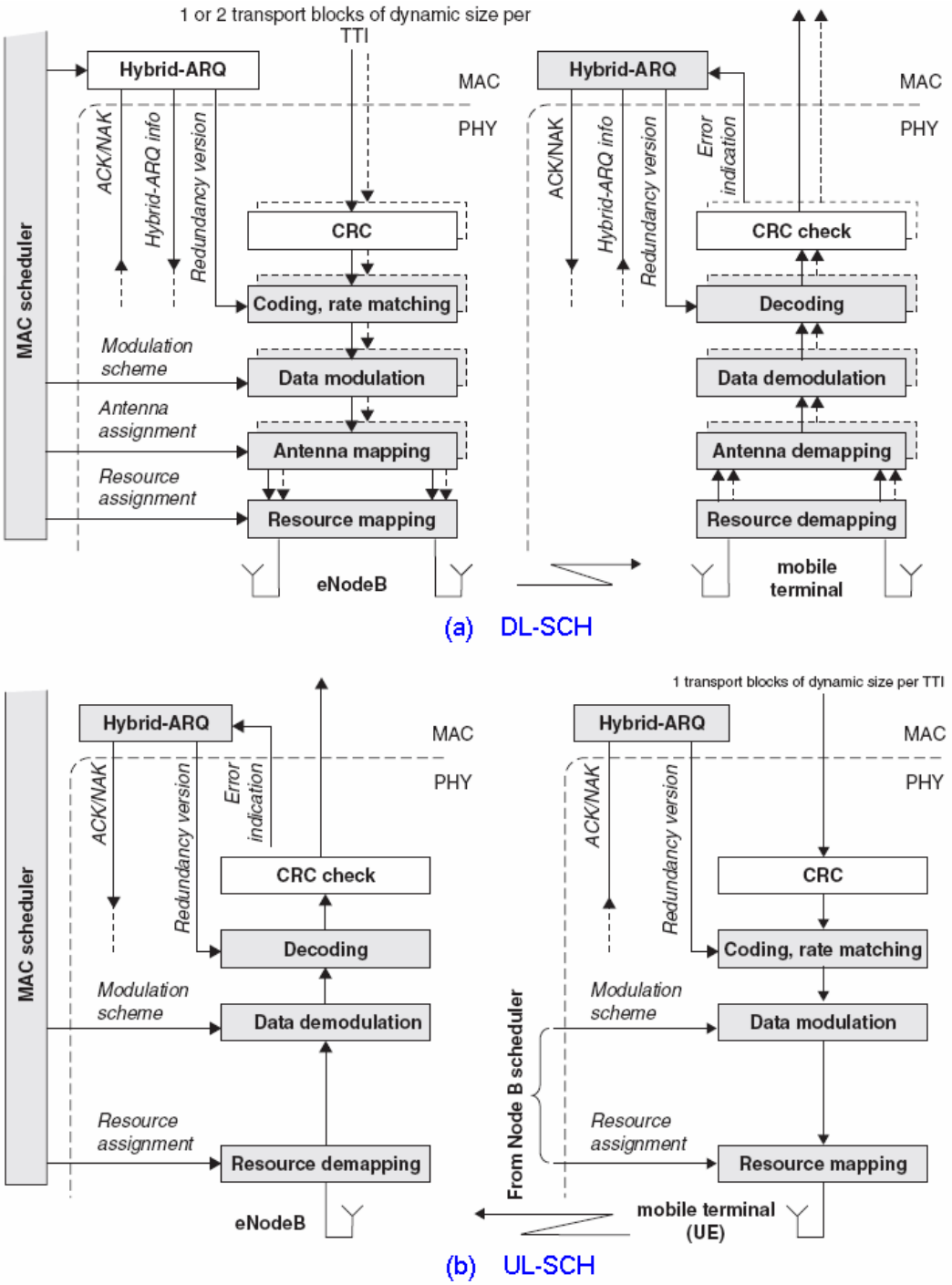

Figura A2.1 *Proceso simplificado de la capa PHY para DL-SCH y UL-SCH.*

ANEXO III
Evaluación de LTE en 3GPP

Requerimientos de desempeño.

Las metas para el desempeño de LTE fueron definidas por el 3GPP en el 2005 y documentadas en el 3GPP TR25.913. Las medidas para el desempeño del sistema son:

- Rendimiento promedio del usuario: Medido por *MHz* como el promedio por encima de todos los usuarios.
- Rendimiento del usuario en el borde de la celda: Medido por *MHz* en el 5 º percentil de la distribución de usuario (95% de los usuarios tienen un mejor rendimiento).
- Eficiencia del espectro: El rendimiento de sistema por sector en *bps/MHz/site*.
- Cobertura: *Performance* en grandes celdas.

Si bien las soluciones detalladas tecnológicas para LTE no deben ser una base para los requisitos de desempeño, el número de antenas Tx y Rx configuradas para la BS y la UE debe ser acordado como requisitos previos para las metas planteadas. La razón es que un aumento en el número de antenas también puede verse como una limitación para la solución seleccionada debido al aumento de complejidad. Esto en teoría es posible ya que se puede obtener ganancias extremadamente grandes, asumiendo un número de antenas impracticables. Las siguientes configuraciones de enlace ascendente y descendente son elegidas para las metas LTE en:

- Un enlace descendente LTE con un máximo de 2 antenas Tx en la BS y 2 antenas Rx en la UE.
- Un enlace ascendente LTE con un máximo de una sola antena Tx en la UE y 2 antenas Rx en la BS.

El desempeño es evaluado en el enlace ascendente y descendente separadamente y los objetivos son establecidos en relación a la referencia del sistema detallado en el Release 6. Este sistema de referencia consiste de:

- El enlace descendente basado en HSDPA con una sola antena Tx en el NodoB con un rendimiento mejorado en el receptor Tipo 1 de la UE (requisitos basados sobre la diversidad de antena dual).
- El enlace ascendente basado en *Enhanced Uplink* (mejora de enlace ascendente) con una sola antena Tx en la UE y 2 antenas Rx en el NodoB.

Las metas para el desempeño de LTE acordados se muestran en la Tabla A3.1. Dado que se espera que tanto el rendimiento promedio de usuario como la eficiencia del espectro sean beneficiados por el aumento de 1 a 2 antenas Tx en el enlace descendente, este es el objetivo de aumentar el rendimiento del usuario en el borde de la celda el cual sería el desafío en el enlace descendente.

Medidas de desempeño	Meta relacionada al Rel-6 (Downlink) HSDPA	Meta relacionada al Rel-6 (Uplink) Enhanced UL
Rendimiento promedio del usuario (por MHz)	3-4x	2-3x
Rendimiento del usuario en el borde de la celda (por MHz, 5º percentil)	2-3x	2-3x
Efic. del espectro (bps/MHz/site)	3-4x	2-3x
Cobertura	Cumplir las metas hasta los 5 Km. de rango de celda.	Cumplir las metas hasta los 5 Km. de rango de celda.

Tabla A3.1 *Metas para el desempeño LTE en TR25.913.*

Desempeño de LTE con FDD 20MHz.

LTE soporta una gama de diferentes portadoras de ancho de banda de hasta 20 MHz, además, un mayor ancho de banda ofrece una mayor transmisión y rendimiento de los datos para el usuario. Los resultados de la simulación de una portadora de 20 MHz en el enlace descendente LTE se muestran en Figura A3.1. Las cifras se basan en una simulación dinámica en la evaluación descendente 3GPP.

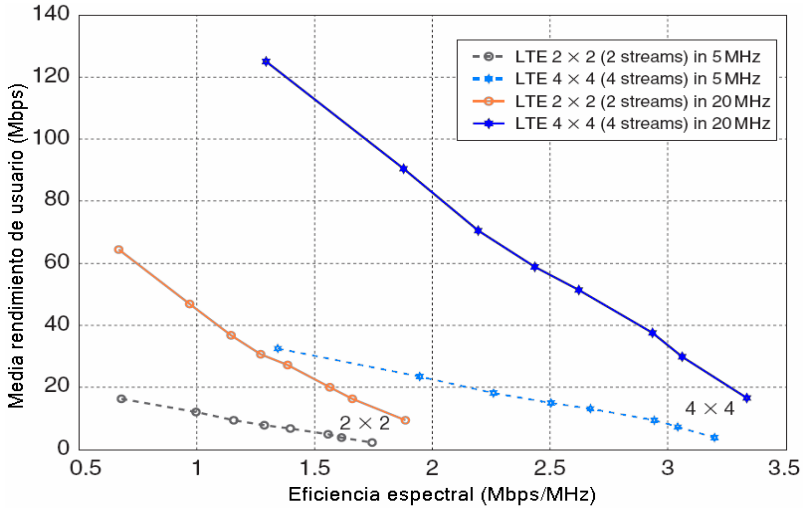

Figura A3.1 *Simulacion de una portadora de 20 MHz y de 5 MHz con MIMO2x2 y MIMO2x4.*

Se ve una media del rendimiento para una portadora de 20 MHz, es 4 veces mayor que una de 5 MHz para el tráfico de carga. A pesar que los 20 MHz proporcionan este aumento de velocidad de transmisión de datos, la máxima de eficiencia espectral con altas cargas, es prácticamente la misma.

Hipótesis	
Potencia Estación Base (BS)	40W (20 MHz) y 20W (5 MHz)
Modelo de propagación	(modelo de canal espacial)
Distancia inter-sitio	500 m
Scheduling	Equidad proporcional en tiempo y frecuencia

Tabla A3.2 *Hipótesis para los resultados de la Figura A3.1.*

ANEXO IV
LSTI

La iniciativa de Pruebas LTE/SAE (LTE/SAE *Trial Initiative*), es una inicitativa para probar tecnologías colaborativas a nivel global, enfocadas en acelerar la viabilidad de sistemas de banda ancha móvil de LTE interoperables, de próxima generación. Esta formado por un grupo de operadores y proveedores. La iniciativa se lanzó formalmente en mayo de 2007 por las compañías líderes en telecomunicaciones: Alcatel-Lucent, Ericsson, Orange, Nokia, Nokia Siemens Networks, Nortel, T-Mobile y Vodafone.

En la Figura A4.1 se muestran todos los participantes que tiene la Iniciativa LSTI en la actualidad, que llegan aun total de 32 participantes.

Figura A4.1 *Participantes LSTI.*

ANEXO V

Espectro 3G en Chile

La siguiente Tabla muestra las bandas asignadas a los operadores móviles existentes en Chile, que operan entre los 800 MHz y 1900 MHz.

Empresa	Rango frecuencia	Tecnología de acceso
Telefónica Móviles de Chile S.A.	824.0 a 835.0 MHz (Rx) 845,0 a 846,5 MHz (Rx) 869.0 a 880.0 MHz (Tx) 890,0 a 891,5 MHz (Tx)	GSM (TDMA, FDMA)
Claro Chile S.A. (ex Smartcom S.A.)	835,0 a 845,0 MHz (Rx) 846,5 a 849,0 MHz (Rx) 880,0 a 890,0 MHz (Tx) 891,5 a 894,0 MHz (Tx)	GSM
Entel Telefonía Móvil S.A.	1.850 a 1.865 MHz 1.930 a 1.945 MHz (Banda A)	GSM
Telefónica Móviles de Chile S.A.	1.865 a 1.870 MHz (Rx) 1.945 a 1.950 MHz (Tx) (Banda D)	GSM (TDMA)
Claro Chile S.A. (ex Smartcom S.A.)	1.870 a 1.885 MHz 1.950 a 1.965 MHz (Banda B)	CDMA - GSM
Telefónica Móviles de Chile S.A.	1.885 a 1.890 MHz (Rx.) 1.965 a 1.970 MHz (Tx.) (Banda E)	GSM (TDMA)
Telefónica Móviles Chile S.A.	1.890 a 1.895 MHz (Rx) 1.970 a 1.975 MHz (Tx) (Banda F)	GSM (TDMA)
Entel PCS Telecomunicaciones S.A.	1.895 a 1.910 MHz 1.975 a 1.990 MHz (Banda C)	GSM - WCDMA

(Fuente: Subtel)

Tabla A5.1 *Bandas asignadas a las operadores.*

Espectro móvil de banda ancha asignado y no asignado.

En base a la información proporcionado por SUBTEL de los futuros concursos de espectro para los servicios Fijo - Móvil y Móvil se puede observar en la Figura A5.2 que existen 519,2 MHz disponibles para asignar en concursos públicos durante el año 2009 y quedarán 30 MHz en reserva en la banda 1.755 – 1.770 MHz y 2.155 – 2.170 MHz. Se encuentran asignadas y en uso por las empresas móviles 212 MHz de ancho en las bandas 860 MHz y 1900 MHz. El nuevo espectro que someterá a concurso SUBTEL es casi 250% más que el existente en la actualidad.

Esta medida es muy previsora de parte de SUBTEL ya que viene a responder a la demanda de los actuales y nuevos operadores para ofrecer servicios móviles de banda ancha, ya que las actuales bandas de frecuencias asignadas a la telefonía móvil se encuentran utilizadas con servicios principalmente de voz y datos de banda angosta.

ESPECTRO PARA APLICACIONES MÓVILES 3G DE DATOS EN BANDA ANCHA

Nuevas bandas	Bloque de Espectro no asignado (MHz)	En reserva (MHz)	En uso (MHz)	Empresa
698 - 806 MHz	108			
896-899,6 MHz y 935-938,6 MHz	7,2			
824-835 MHz y 869-880 MHz; 845-846,5 MHz y 890-891,5 MHz			25	Telefónica Móviles de Chile S.A.
835-845 MHz y 880-890 MHz; 846,5-849 MHz y 891,5-894 MHz			25	Claro Chile S.A.
1.785-1.805 MHz	20			
1.710 - 1.770 y 2.110 - 2.170 MHz	90	30		
1.850-1.865 MHz y 1.930-1.945 MHz			30	ENTEL Telefonía Móvil S.A.
1.895-1.910 MHz y 1.975-1.990 MHz			30	Entel PCS Telecomunicaciones S.A.
1.865-1.870 MHz y 1.945-1.950 MHz; 1.885-1.895 MHz y 1.965-1.975 MHz			30	Telefónica Móviles de Chile S.A.
1.970-1.885 MHz y 1.950-1965 MHz			30	Claro Chile S.A.
2.300 - 2.400 MHz	100		Enlaces P-P PMP	
2.496 - 2.960 MHz	194		42	
TOTAL DE ESPECTRO	519,2	30	212	

Fuente: SUBTEL

Tabla A5.2 *Espectro asignado y por asignar a móviles de banda ancha.*

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

LIBROS:

[1]. Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Sköld and Per Beming, HSPA and LTE for Mobile Broadband, 1º Edicion, ELSEIVER, San Diego, USA, 2007.

[2]. Farooq Khan, LTE for 4G Mobile Broadband Air Interface Technologies and Performance, 1º Edicion, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, New York, USA, 2009.

[3]. Harri Holma, Antti Toskala, WCDMA for UMTS – HSPA Evolution and LTE, 4º Edicion, WILEY, England, 2007.

[4]. Pierre Lescuyer, Thierry Lucidarme, Evolved Packet System (EPS) The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS, 1º Edicion, WILEY, England, 2008.

REVISTAS:

[5]. Alfonso Miñarro López, LTE/SAE, una apuesta segura en la evolución de las redes móviles, Antena de Telecomunicación, pag. 27-31, Junio 2009.

[6]. Blanca Seguro Velasco, Tecnología de Núcleo de Red, bit 162, pag 61-65, Abril-Mayo 2007.

[7]. Julius Robson, The LTE/SAE Trial Initiative: Taking LTE/SAE from Specification to Rollout, IEEE Communications Magazine, pag. 82-88, Abril 2009.

[8]. Luís Fernando Real Martín, Estándares y liderazgo de mercado, Antena de Telecomunicación, pag. 26-31, Marzo 2009.

[9]. Miguel Angel Fernández, UMTS LTE - Rumbo a la Nueva Generación de Telefonía Móvil, Telecomunicaciones, Dpto de Instrumentación de Rohde & Schwarz España, pag. 74-77, 2007.

WHITE PAPERS:

[10]. Alvarion, Comparing Mobile WiMAX, 3G and Beyond, 2007.

[11]. Michael W. Thelander, La evolución de 3G Llevando CDMA2000 a la próxima década, CDMA Development Group, 2005.

[12]. Rysavy Research and 3G Americas, EDGE, HSPA, LTE - The Mobile Broadband Advantage, 2007.

[13]. Rysavy Research and 3G Americas, EDGE, HSPA and LTE – Broadband Innovation, 2008.

[14]. Ulrich Barth, 3GPP Long-Term Evolution / System Architecture Evolution Overview, ALCATEL, 2006.

PRESENTACIONES Y OTROS:

[15]. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Physical Channels and Modulation (Release 8), Multiplexing and Channel Coding (Release 8), Physical Layer Procedures (Release 8), 3GPP.

[16]. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Network Architecture (Release 7), General Packet Radio Service (GPRS); Service Description; Stage 2 (Release 7)'3GPP.

[17]. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; 3GPP System Architecture Evolution: GPRS, Enhancements for LTE Access; Release 8, 3GPP.

[18]. Alexandria University Faculty of Engineering, WIMAX vs LTE, 2008.

[19]. Comsys communication and Signal Processing Ltd, The four W's of LTE, 2007.

[20]. Comsys communication and Signal Processing Ltd, LTE & WiMAX Evolution to 4G, 2008.

[21]. David Gómez Barquero, Ana Fernández Aguilella, Narcís Cardona Marcel, Transmisión Multicast de Servicios de Descarga de Archivos en Redes Móviles 3G con MBMS, Universidad Politécnica de Valencia, 2007.

[22]. Don Zelmer, AT&T's Vision of LTE, AT&T Radio Standards, 2009.

[23]. Dr. Stefan Parkvall, Long-Term 3G Evolution – Radio Access, Ericsson Research, 2005.

[24]. ETSI, Digital Video Broadcasting (DVB): Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Digital Terrestrial Television', ETS EN 300 744 v 1.1.2.

[25]. Jaewook Shin, Kwangryul Jung and Aesoon Park, Design of Session and Bearer Control Signaling in 3GPP LTE System.

[26]. Nokia Siemens Networks, Making the most of 2G investments while migrating to 3G HSPA and LTE, 2008.

[27]. Stefan Parkvall, and Erik Da.hlman, Performance Comparison of HARQ with Chase Combining and Incremental Redundancy for HSDPA, 2001.

[28]. Thomas Norén, LTE Overview Webinar, Ericsson AB, 2009.

[29]. Weimin Xiao, Rapeepat Ratasuk1, Amitava Ghosh, Robert Love, Yakun Sun and Ravi Nory, Uplink Power Control, Interference Coordination and Resource Allocation for 3GPP E-UTRA, 2006.

PAGINAS WEB:

[30]. www.lstiforum.org.

[31]. www.umtsfo-rum.org.

[32]. www.3gpp.org.

[33]. www.alcatel-lucent.com/es.

[34]. www.3gamericas.org

[35]. www.motorola.com

[36]. www.bnamericas.com/news/telecomunicaciones.

[37]. www.itu.int.