



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

" E SCIENTIA HOMINIS SALUS "

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ESTUDIO Y ANÁLISIS TÉCNICO COMPARATIVO ENTRE LAS TECNOLOGÍAS 4G LONG TERM EVOLUTION (LTE) Y LTE ADVANCED

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

CAMILO IVÁN CALLE CÁCERES

cml_tel@yahoo.com

DIRECTORA: MSc. MARÍA SOLEDAD JIMÉNEZ JIMÉNEZ

maria.jimenez@epn.edu.ec

Quito, Agosto 2013

DECLARACIÓN

Yo, Camilo Iván Calle Cáceres, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Camilo Iván Calle Cáceres

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Camilo Iván Calle Cáceres, bajo mi supervisión.

MSc. María Soledad Jiménez
DIRECTORA DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios por haberme dado la oportunidad de venir a este mundo y por haberme dado la sabiduría necesaria para poder concluir con el presente proyecto de titulación.

Recuerdo que cuando las cosas se ponían difíciles, mis padres, Luis y Laura hacían lo imposible por mantenernos unidos, nunca nos abandonaron, siempre nos dieron lo mejor, gracias por su amor, cariño y por siempre estar conmigo, son mi fuente de inspiración, los quiero mucho papi y mami.

A mis hermanos por toda su entrega y ayuda que me supieron brindar en el transcurso de mi vida. Gracias Jorge, siempre que quería desviarme y tomar malos rumbos, estuviste ahí para ponerme en el camino correcto. Gracias Santiago, siendo menor a mí me has enseñado que los problemas de la vida hay que tomarlos con tranquilidad y serenidad. Talía, gracias por tu forma única de ser, eres esa persona muy detallista y cariñosa que le pone salsa a la vida. Andrés, gracias por tener un espíritu fuerte y soportarme.

Gracias MSc. María Soledad Jiménez por la conducción y por el apoyo brindado desde el primer momento en el presente proyecto de titulación.

Gracias Escuela Politécnica Nacional, por todo el apoyo brindado, a lo largo de mi carrera universitaria.

Gracias queridos profesores por sus enseñanzas, tanto profesionales como humanas.

Finalmente un agradecimiento a mis amigos de la universidad, del colegio y del barrio por todo el apoyo que me supieron brindar cuando los necesité.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de titulación a:

Dios, Jesús y María ya que de alguna manera me hicieron sentir su calidez espiritual cuando más lo necesitaba.

Mis padres, Luis y Laura, porque supieron darme el apoyo siempre y en todo momento, sin importar las circunstancias y condiciones.

Mis hermanos, Jorge, Santiago, Talia y Andrés, sin ustedes mi vida no estuviera llena de logros.

Mi abuelita María por el apoyo que sentía desde el cielo cuando me encontraba en problemas.

Todas las personas que de alguna u otra manera contribuyeron al desarrollo del presente proyecto de titulación.

CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTO	III
DEDICATORIA.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
RESUMEN.....	XVIII
PRESENTACIÓN	XX

CAPÍTULO 1: TECNOLOGÍAS DE CUARTA GENERACIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 LA CONFUSIÓN CREADA ALREDEDOR DE 4G	2
1.3 EVOLUCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS CELULARES.....	5
1.3.1 PRIMERA GENERACIÓN 1G	5
1.3.2 SEGUNDA GENERACIÓN 2G	6
1.3.3 GENERACIÓN 2.5G	6
1.3.4 TERCERA GENERACIÓN 3G	7
1.3.5 GENERACIÓN 3.5G Y 3.75G	7
1.3.6 CUARTA GENERACIÓN 4G.....	8
1.4 HSPA+: HIGH SPEED PACKET ACCESS PLUS.....	9
1.4.1 BANDAS DE FRECUENCIA	11
1.4.2 COBERTURA.....	12
1.4.3 SERVICIOS	12
1.4.4 EQUIPOS TERMINALES.....	13
1.5 TECNOLOGÍA WiMAX.....	13
1.5.1 EL ESTÁNDAR IEEE 802.16 Y SUS VERSIONES	14
1.5.2 ESPECTRO DE FRECUENCIA.....	15
1.5.3 COBERTURA.....	17
1.5.4 MOBILE WIMAX IEEE 802.16e.....	17
1.5.4.1 Características relevantes de Mobile WiMAX.....	18
1.5.5 WiMAX 2.0 IEEE 802.16m	20
1.5.5.1 Características principales de IEEE 802.16m	20

1.5.6 APLICACIONES Y SERVICIOS DE WiMAX	22
1.5.7 EQUIPOS TERMINALES	23
1.6 LTE y LTE ADVANCED	24
REFERENCIAS DEL CAPÍTULO 1	26

CAPÍTULO 2: TECNOLOGÍA 4G LTE

2.1 INTRODUCCIÓN.....	30
2.2 ARQUITECTURA GENERAL DE LOS SISTEMAS 3GPP.....	31
2.3 ARQUITECTURA DEL SISTEMA LTE.....	33
2.3.1 ARQUITECTURA DE E-UTRAN	34
2.3.1.1 Entidades de red e interfaces	35
2.3.1.1.1 Evolved Node B (eNB).....	35
2.3.1.1.2 Interfaz Radio Uu	37
2.3.1.1.3 Interfaz S1 (eNB – EPC).....	38
2.3.1.1.4 Interfaz X2(eNB – eNB).....	41
2.3.1.2 Protocolos	41
2.3.1.2.1 Protocolos en la interfaz radio.....	42
2.3.1.2.2 Protocolos en las interfaces S1 y X2	43
2.3.2 ARQUITECTURA DE EPC (RED TRONCAL DE PAQUETES EVOLUCIONADA).....	46
2.3.2.1 Entidades de red de EPC	49
2.3.2.1.1 Mobility Management Entity (MME)	50
2.3.2.1.2 Serving Gateway (S-GW)	51
2.3.2.1.3 PDN Gateway (P-GW)	52
2.3.2.1.4 HSS (Home Subscriber Server)	52
2.3.2.2 Interfaces de EPC	53
2.3.2.2.1 Interfaz SGi (P-GW - Redes Externas).....	53
2.3.2.2.2 Interfaces S5 y S8 (P-GW - S-GW).....	54
2.3.2.2.3 Interfaz S11 (MME - S-GW).....	55
2.3.2.2.4 Interfaz S10 (MME - MME)	56
2.3.2.2.5 Interfaz S6a (HSS – MME).....	56
2.3.2.3 Protocolos en EPC	57

2.3.2.3.1	<i>Protocolo GTP-U</i>	57
2.3.2.3.2	<i>Protocolo GTP-C</i>	59
2.3.2.3.3	<i>Protocolo Diameter</i>	60
2.3.2.3.4	<i>Protocolo PMIPv6</i>	61
2.3.2.3.5	<i>Protocolos NAS</i>	63
2.3.3	IP MULTIMEDIA SUBSYSTEM (IMS)	65
2.3.4	EQUIPO DE USUARIO	68
2.4	INTERFAZ RADIO DE LTE	70
2.4.1	DESCRIPCIÓN DE LA PILA DE PROTOCOLOS, CANALES LÓGICOS Y CANALES DE TRANSPORTE	72
2.4.1.1	BMC (Broadcast/Multicast Control Protocol).....	72
2.4.1.2	RRC (Radio Resource Control).....	73
2.4.1.3	PDCP (Packet Data Convergence Protocol).....	73
2.4.1.4	RLC (Radio Link Control)	74
2.4.1.5	MAC (Medium Access Control)	74
2.4.1.6	Canales Lógicos.....	76
2.4.1.6.1	<i>Canales Lógicos de Tráfico</i>	76
2.4.1.6.2	<i>Canales Lógicos de Control</i>	77
2.4.1.7	Canales de Transporte	78
2.4.1.7.1	<i>Enlace descendente</i>	78
2.4.1.7.2	<i>Enlace ascendente</i>	78
2.4.2	CAPA FÍSICA.....	79
2.4.2.1	Bloque de Recursos Físicos (Physical Resource Block PRB).....	80
2.4.2.2	Estructura de trama tipo 1 (SF1).....	83
2.4.2.3	Estructura de trama tipo 2 (SF2).....	84
2.4.2.4	Capa Física: Enlace Descendente	86
2.4.2.4.1	<i>Señales Físicas</i>	86
2.4.2.4.2	<i>Canales Físicos en el enlace descendente</i>	88
2.4.2.5	Capa Física: Enlace Ascendente.....	94
2.4.2.5.1	<i>Señales de referencia en UL</i>	94
2.4.2.5.2	<i>Canales Físicos en el enlace ascendente</i>	95
2.5	TECNOLOGÍAS DE NIVEL FÍSICO	99
2.5.1	OFDM (ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING).....	99

2.5.1.1 Prefijo cíclico.....	101
2.5.1.2 Modulación OFDM	102
2.5.1.3 Demodulación OFDM	103
2.5.2 OFDMA (ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS)....	104
2.5.2.1 Ventajas de OFDMA	106
2.5.2.2 Desventaja de OFDMA	107
2.5.3 SC-FDMA (SINGLE CARRIER FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS).....	107
2.5.4 COMPARACIÓN ENTRE OFDMA y SC-FDMA	110
2.5.5 MIMO.....	111
2.5.5.1 Definición de MIMO	112
2.5.5.2 Diversidad en el espacio	112
2.5.5.3 Técnicas de transmisión de MIMO	113
2.5.5.3.1 <i>Diversidad de Antenas</i>	113
2.5.5.3.2 <i>Multiplexación Espacial (Spatial Multiplexing - SM)</i>	115
2.5.5.3.3 <i>Beamforming</i>	116
2.5.5.4 Funcionamiento de MIMO	116
2.5.5.5 MIMO en LTE.....	117
2.5.5.5.1 <i>Terminología para múltiples antenas en LTE</i>	118
2.5.5.5.2 <i>SU-MIMO Y MU-MIMO en el downlink de LTE</i>	118
2.5.5.5.3 <i>Modos de operación o transmisión de MIMO en el downlink de LTE</i>	118
2.5.5.5.4 <i>SU-MIMO Y MU-MIMO en el uplink de LTE</i>	121
2.6 ASPECTOS PRÁCTICOS DE IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED 4G LTE.....	123
2.6.1 PLAN DE MERCADO	123
2.6.2 PLAN DE INGENIERÍA	124
2.6.3 PLAN FINANCIERO	127
2.6.4 HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN	129
REFERENCIAS DEL CAPÍTULO 2.....	130

CAPÍTULO 3: LTE ADVANCED

3.1 INTRODUCCIÓN.....	134
3.1.1 DOCUMENTOS 3GPP PARA LTE-ADVANCED	137
3.1.2 BANDAS DE FRECUENCIA EN LTE-ADVANCED.....	137
3.1.3 ARQUITECTURA DE LTE-ADVANCED.....	139
3.1.4 CARACTERÍSTICAS QUE DEFINEN A LTE-Advanced.....	140
3.2 AGREGACIÓN DE PORTADORA	141
3.3 TÉCNICAS DE MÚLTIPLES ANTENAS PARA LTE-ADVANCED.....	145
3.3.1 MIMO MEJORADO EN LTE-ADVANCED.....	146
3.3.2 MIMO EN EL DOWNLINK DE LTE-ADVANCED	148
3.3.2.1 Transmisión de Múltiples Antenas en el downlink	148
3.3.2.2 Señales de Referencia en el downlink	149
3.3.2 MIMO EN EL UPLINK DE LTE-ADVANCED.....	152
3.3.2.1 Transmisión de Múltiples Antenas en el UPLINK.....	152
3.3.2.2 Esquema de acceso mejorado en el UL	154
3.3.2.3 Señales de Referencia en el uplink.....	155
3.4 COORDINATED MULTIPOINT (CoMP) TRANSMISSION AND RECEPTION.....	156
3.4.1 DOWNLINK LTE COMP	158
3.4.2 UPLINK LTE COMP	159
3.4.3 VENTAJAS DE CoMP	160
3.5 RELAYING.....	160
3.5.1 ESCENARIOS DE DESPLIEGUE	163
3.5.2 TIPOS DE RELAY NODES	164
REFERENCIAS DEL CAPÍTULO 3.....	167

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LTE Y LTE-ADVANCED

4.1 COMPARACIÓN TECNOLÓGICA	169
4.2 COMPARACIÓN DE BANDAS DE FRECUENCIA	173
4.3 COMPARACIÓN DE LA ARQUITECTURA DE RED.....	178
4.3.1 PLANO DE USUARIO Y PLANO DE CONTROL	182
4.4 COMPARACIÓN DE LA CAPA FÍSICA.....	188
4.5 COMPARACIÓN DE LOS ESQUEMAS DE MODULACIÓN.....	194
4.6 COMPARACIÓN DE LA VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN Y LA EFICIENCIA ESPECTRAL.....	200
4.6.1 VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN PICO	200
4.6.2 VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN PROMEDIO	201
4.6.3 EFICIENCIA ESPECTRAL PROMEDIO Y EN EL BORDE DE LA CELDA ...	204
4.7 COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE MÚLTIPLES ANTENAS.....	206
4.8 COMPARACIÓN DE CATEGORÍAS DE EQUIPO DE USUARIO	208
4.9 COMPARACION DE SERVICIOS Y APLICACIONES	212
4.10 COMPARACIÓN DE REDES DESPLEGADAS Y LANZAMIENTO COMERCIAL.....	216
REFERENCIAS DEL CAPÍTULO 4.....	220

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES.....	222
5.2 RECOMENDACIONES	226

ANEXOS	227
ANEXO A: Informe Técnico. LTE; Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA)(LTE-Advanced)(3GPP TR 36.913 version 8.0.1 Release 8)	A-1
ANEXO B: Informe Técnico. LTE; Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced) (3GPP TR 36.913 version 10.0.0 Release 10)	B-1
ANEXO C: Solución de <i>EPC (Evolved Packet Core)</i> de <i>Alcatel-Lucent</i>	C-1
ANEXO D: Tecnologías <i>MIMO</i> para <i>LTE</i> y <i>LTE-Advanced</i>	D-1
ANEXO E: El desempeño de <i>SU-MIMO</i> y <i>MU-MIMO</i> en el enlace descendente de <i>LTE</i>	E-1
ANEXO F: <i>SU-MIMO</i> vs <i>MU-MIMO</i> en el enlace descendente de <i>LTE-Advanced</i>	F-1
ANEXO G: Estado de implementación de <i>HSPA/HSPA+/LTE</i> según <i>4G Americas</i>	G-1
ANEXO H: Información proporcionada por el <i>GSA (Global mobile Suppliers Association)</i> sobre los despliegues de <i>LTE</i> a nivel mundial.....	H-1

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1: TECNOLOGÍAS DE CUARTA GENERACIÓN

Figura 1.1. Velocidad 4G alcanzada en Estados Unidos.....	4
Figura 1.2. Tecnologías 4G de distintos operadores.....	5
Figura 1.3. Evolución de las tecnologías celulares.....	8
Figura 1.4. Pasos evolutivos de las redes HSPA+	10
Figura 1.5. Evolución de la Tecnología 3GPP.....	11
Figura 1.6. Redes desplegadas de HSPA y HSPA+ en el mundo	12
Figura 1.7. Evolución de WiMAX	15
Figura 1.8. Espectro utilizado por la Tecnología WiMAX.....	16
Figura 1.9. Aplicaciones de WiMAX.....	23
Figura 1.10. Dispositivos WiMAX.....	24

CAPÍTULO 2: TECNOLOGÍA 4G LTE

Figura 2.1. Arquitectura de los sistemas 3GPP.....	31
Figura 2.2 Arquitectura detallada de LTE.....	34
Figura 2.3. Elementos que forman parte de E-UTRAN	36
Figura 2.4. (a) Servicios portadores E-RAB. (b) Servicios Portadores de LTE en las diferentes interfaces de EPS.	40
Figura 2.5. Torre de protocolos en la interfaz radio.....	42
Figura 2.6. Torre de protocolos en las interfaces S1 y X2.....	43
Figura 2.7. Protocolos del plano de usuario de E-UTRAN	45
Figura 2.8. Protocolos del plano de control de E-UTRAN	46
Figura 2.9. Arquitectura de EPC	47
Figura 2.10. Elementos básicos de EPC.....	47
Figura 2.11. Modelos básicos de interconexión de la red LTE	54
Figura 2.12. Interfaces basadas en GTP-U.....	58
Figura 2.13. Funcionamiento de un túnel GTP-U.....	58
Figura 2.14. Interfaces basadas en GTP-U.....	60
Figura 2.15. Interfaces basadas en Diameter	61
Figura 2.16. Componentes del protocolo PMIPv6.....	62
Figura 2.17. Plano de usuario, control e interfaces basadas en PMIPv6.....	63

Figura 2.18. Protocolos <i>NAS</i>	64
Figura 2.19. Modelo de provisión de servicios <i>IMS</i>	68
Figura 2.20. Equipo de usuario.....	70
Figura 2.21. Interfaz Radio de <i>LTE</i>	72
Figura 2.22. Esquema general del número de subportadoras para determinado ancho de banda.....	81
Figura 2.23. Estructura de un <i>PRB</i>	81
Figura 2.24. Estructura de trama tipo 1 (Modo <i>FDD</i>).....	83
Figura 2.25. Estructura de trama tipo 2 (Modo <i>TDD</i>).....	84
Figura 2.26. Ubicación de las señales de referencia <i>RSP</i> y <i>RSS</i>	87
Figura 2.27. Mapeo de canales y señales.....	98
Figura 2.28. Subportadoras y símbolo <i>OFDM</i>	100
Figura 2.29. Cinco subportadoras formando una portadora <i>OFDM</i>	101
Figura 2.30. Inserción del Prefijo Cíclico <i>CP</i>	102
Figura 2.31. Esquema simplificado de la modulación <i>OFDM</i>	102
Figura 2.32. Modulador <i>OFDM</i>	103
Figura 2.33. Esquema simplificado de la demodulación <i>OFDM</i>	103
Figura 2.34. Demodulador <i>OFDM</i>	104
Figura 2.35. Asignación de recursos de diferentes usuarios en <i>OFDMA</i>	105
Figura 2.36. Diferencia entre <i>OFDM</i> y <i>OFDMA</i>	105
Figura 2.37. Esquema de transmisión <i>OFDMA</i>	106
Figura 2.38. Asignación de recursos de diferentes usuarios en <i>SC-FDMA</i>	108
Figura 2.39. (a) Trasmisión y (b) Recepción en <i>SC-FDMA</i>	109
Figura 2.40. <i>OFDMA</i> y <i>SC-FDMA</i>	109
Figura 2.41. Diversidad Espacial.....	113
Figura 2.42. Codificador <i>STBC</i>	114
Figura 2.43. Multiplexación Espacial.....	115
Figura 2.44. Esquemas <i>MIMO</i> en el <i>DL</i>	119
Figura 2.45. <i>MU-MIMO UL</i>	122
Figura 2.46. Plan de Negocios.....	124
Figura 2.47. Propuesta completa presentada por <i>Alcatel-Lucent</i> para el despliegue de una red <i>LTE</i>	128
Figura 2.48. Herramientas de predicción y planeación para telefonía móvil.....	129

CAPÍTULO 3: LTE ADVANCED

Figura 3.1. Asignación de nuevo espectro de acuerdo a la <i>WRC-2007</i>	138
Figura 3.2. Agregación de portadora – <i>FDD</i>	142
Figura 3.3. Alternativas <i>intra-band</i> e <i>inter-band</i> para agregación de portadoras	143
Figura 3.4. <i>Serving Cells</i> – Agregación de portadora	145
Figura 3.5. Escenario de <i>Single-Site MIMO</i>	147
Figura 3.6. Escenario de <i>Multi-Site MIMO</i>	147
Figura 3.7. <i>Codewords</i> y <i>layers</i> para 8 puertos de antena	148
Figura 3.8. Modelos de <i>DM-RS</i> o <i>UE-specific RSs</i> en el <i>Release 10 LTE-A</i> . (a) 4 <i>layers</i> (b) 8 <i>layers</i>	150
Figura 3.9. Modelos <i>CSI-RS</i> para <i>LTE-Advanced</i> . (a) Modelo para estructura de trama tipo 1 y tipo 2. (b) Modelo para estructura de trama tipo 2.....	153
Figura 3.10. Esquema de acceso múltiple en el <i>uplink</i>	155
Figura 3.11. <i>LTE-Advanced CoMP</i>	157
Figura 3.12. <i>Joint Processing</i>	158
Figura 3.13. <i>Coordinated Scheduling / Coordinated Beamforming</i> – <i>CS / CB</i>	159
Figura 3.14. Fases de transmisión y recepción de un repetidor y un <i>relay node</i>	161
Figura 3.15. Terminología para <i>relaying</i>	163
Figura 3.16. Casos típicos de <i>relays</i>	165
Figura 3.17. Operación cooperativa de los <i>RNs Type 2</i>	166

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LTE Y LTE-ADVANCED

Figura 4.1. Anchos de banda asignados para las distintas bandas de frecuencias en las que puede trabajar <i>LTE</i> y <i>LTE-Advanced</i>	177
Figura 4.2. Arquitectura general de <i>LTE</i> y <i>LTE-Advanced</i>	179
Figura 4.3. Arquitectura <i>Relay</i> para <i>LTE-Advanced</i>	182
Figura 4.4. Plano de usuario	183
Figura 4.5. Plano de control.....	184
Figura 4.6. Plano de usuario de una topología <i>Relay</i> para <i>LTE-Advanced</i>	186
Figura 4.7. Plano de control de una topología <i>Relay</i> para <i>LTE-Advanced</i>	186
Figura 4.8. Plano de usuario de <i>LTE</i> y <i>LTE-Advanced</i> para el <i>downlink</i>	187
Figura 4.9. Plano de usuario de <i>LTE</i> y <i>LTE-Advanced</i> para el <i>uplink</i>	187

Figura 4.10. Esquema de transmisión <i>OFDM</i>	188
Figura 4.11. Esquema de transmisión <i>OFDMA</i>	190
Figura 4.12. Esquema de transmisión <i>SC-FDMA</i>	192
Figura 4.13. Esquemas de transmisión y comparación de canales en el <i>uplink</i> de <i>LTE</i> y <i>LTE-Advanced</i>	194
Figura 4.14. Esquemas de modulación usados por <i>LTE</i> y <i>LTE-Advanced</i>	195
Figura 4.15. (a) Forma de onda <i>QPSK</i> . (b) Diagrama de constelación de <i>QPSK</i>	196
Figura 4.16. Esquemas de modulación utilizados en función de la <i>SNR</i>	199
Figura 4.17. Capacidad por sector en una macrocelda con un ancho de banda de 10MHz	203
Figura 4.18. Velocidad de transmisión promedio en el borde de una celda por usuario asumiendo 10 usuarios por sector en un ancho de banda de 10 MHz.....	204
Figura 4.19. Eficiencia espectral promedio y en el borde de la celda para el <i>downlink</i> en varios escenarios de acuerdo a la <i>ITU-R</i>	205
Figura 4.20. Eficiencia espectral promedio y en el borde de la celda para el <i>uplink</i> en varios escenarios de acuerdo a la <i>ITU-R</i>	205
Figura 4.21. <i>MIMO downlink</i> , precodificación y señales de referencia en <i>R8</i> y <i>R10</i>	208
Figura 4.22. Categorías de equipos de usuario en (a) <i>LTE Release 8</i> y (b) <i>LTE Release 10</i>	210
Figura 4.23. Número de equipos de usuario en <i>LTE</i>	210
Figura 4.24. <i>Smartphones 4G LTE</i>	211
Figura 4.25. Redes <i>LTE</i> en el mundo	217
Figura 4.26. Evolución de redes comerciales <i>LTE</i>	218

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1: TECNOLOGÍAS DE CUARTA GENERACIÓN

Tabla 1.1. Número de dispositivos lanzados al mercado para redes <i>HSPA</i> y <i>HSPA+</i>	13
Tabla 1.2. Bandas de frecuencia para <i>IEEE 802.16</i>	16
Tabla 1.3 Cobertura de <i>WiMAX</i>	17
Tabla 1.4. Características principales de <i>IEEE 802.16m</i>	22

CAPÍTULO 2: TECNOLOGÍA 4G LTE

Tabla 2.1. Relación entre el número de <i>PRBs</i> y el número de subportadoras para los diferentes anchos de banda que maneja <i>LTE</i>	80
Tabla 2.2. Velocidad de transmisión pico en la interfaz aire de <i>LTE</i>	82
Tabla 2.3. Distintas Combinaciones de las subtramas en modo <i>TDD</i>	85
Tabla 2.4. Secuencias de código <i>Walsh-Hadamard</i> en el <i>PHICH</i>	93
Tabla 2.5. Formatos del canal <i>PRACH</i>	97

CAPÍTULO 3: LTE ADVANCED

Tabla 3.1. Requisitos <i>IMT-Advanced</i> para tecnologías 4G.....	135
Tabla 3.2. Propuesta del <i>3GPP</i> para que <i>LTE-Advanced</i> sea considerada una tecnología 4G	136
Tabla 3.3. Documentos <i>3GPP</i> para <i>LTE-Advanced</i>	137

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LTE Y LTE-ADVANCED

Tabla 4.1. Comparación entre <i>LTE</i> y <i>LTE-Advanced</i>	171
Tabla 4.2. Bandas de frecuencia asignadas para <i>LTE (negro)</i> y <i>LTE-Advanced (rojo)</i>	174
Tabla 4.3. Comparación de los esquemas de modulación	197
Tabla 4.4 Esquemas de modulación utilizados en los canales físicos del <i>downlink</i>	200
Tabla 4.5 Esquemas de modulación utilizados en los canales físicos del <i>uplink</i>	200
Tabla 4.6. Configuraciones <i>SU-MIMO</i> para el <i>downlink</i> de <i>LTE</i>	206
Tabla 4.7. Servicios que ofrecen <i>LTE</i> y <i>LTE-Advanced</i>	215

Tabla 4.8. Operadores en América Latina comprometidos con el despliegue de redes <i>LTE</i> (Actualizado Diciembre 2012).....	219
--	-----

RESUMEN

El presente proyecto de titulación contiene un estudio y análisis de las tecnologías *LTE* y *LTE-Advanced* para realizar una comparación entre ellas, por lo que el proyecto se ha dividido en cinco capítulos.

El primer capítulo se enfoca en describir brevemente las tecnologías consideradas como *4G* desde el punto de vista comercial y técnico, la evolución de las tecnologías celulares y una descripción de *HSPA+* y *WiMAX*, en cada una de ellas se especifica las bandas de frecuencia de operación, aplicaciones, servicios y equipos terminales.

El segundo capítulo trata de la tecnología *LTE* como tal. El estudio de la arquitectura del sistema subdividida en *E-UTRAN*, *EPC*, *IMS* y equipo de usuario y dentro de *E-UTRAN* y *EPC*, las entidades de red e interfaces asociadas, así como los protocolos usados, dan la partida para el inicio de este capítulo. Posteriormente se realiza un análisis completo de la interfaz radio de *LTE*, en donde se realiza una descripción de la pila de protocolos, canales lógicos y canales de transporte asociados a dicha interfaz. También se presenta un estudio de la estructura de las tramas, señales físicas y canales físicos en los enlaces *uplink* y *downlink*. Después se realiza un análisis de las tecnologías de nivel físico empleadas, es decir *OFDM*, *OFDMA*, *SC-FDMA*, una comparación entre *OFDMA* y *SC-FDMA* y técnicas de múltiples antenas *MIMO*. Finalmente se realiza un estudio de los aspectos prácticos de implementación de una red *LTE*.

El tercer capítulo se encarga de estudiar a *LTE-Advanced* para lo cual se presentan estudios de estandarización, bandas de frecuencia, arquitectura del sistema, métodos de acceso y características que definen a *LTE-Advanced*. Como una mejora a *LTE*, *LTE-Advanced* propone el uso de agregación de portadora, técnicas de múltiples antenas mejoradas para *uplink* y *downlink*, *CoMP* y *Relaying*; cada una de estas mejoras es analizada individualmente.

El cuarto capítulo presenta la comparación entre *LTE* y *LTE-Advanced* para lo cual se realiza una comparación a nivel tecnológico, de bandas de frecuencia, de la arquitectura de red, de la capa física, de los esquemas de modulación, de la velocidad de transmisión, de las técnicas de múltiples antenas, de las categorías de equipos de usuario, de los servicios, aplicaciones, de redes desplegadas y lanzamientos comerciales.

Finalmente el capítulo cinco trata sobre las conclusiones y recomendaciones del presente proyecto de titulación.

PRESENTACIÓN

En vista de la creciente demanda de las comunicaciones móviles y los avances tecnológicos de hoy en día, los usuarios exigen cada vez más y mejores servicios a los operadores de telefonía móvil. Estos servicios tienen que ver con la mejora de la calidad de sus llamadas, amplia cobertura y soporte de aplicaciones de altas velocidades de transmisión como video llamadas, acceso rápido a Internet, descarga de aplicaciones como juegos, música y videos a una buena velocidad.

Para conseguir los objetivos anteriormente planteados es hora de dar paso a una nueva red móvil que cumpla con todas estas expectativas, es hora de dar paso a las tecnologías *LTE* y *LTE Advanced* como las tecnologías que cambiarán la forma en que nos comunicamos.

Es por ello que el enfoque de este proyecto de titulación se basa en estudiar y analizar las tecnologías *4G*, *LTE* y *LTE-Advanced*. Una vez alcanzado el conocimiento necesario se podrá entender cómo es posible que este tipo de tecnologías permitan mejorar notablemente el rendimiento de una red celular, además conocer las ventajas y mejoras que presenta *LTE-Advanced* con respecto a *LTE*; es por ello que contar con un proyecto de titulación de esta naturaleza no solo que fortalecerá el aprendizaje de las tecnologías en cuestión sino que también constituirá una fuente idónea de información.

Finalmente realizar una comparación entre ambas tecnologías lo que busca es brindar una solución en el ámbito profesional, ya que dependiendo de las necesidades y aplicaciones que se quieran brindar a los usuarios va a ser ideal usar una u otra tecnología. Es por ello muy importante generar un gran aporte de investigación para los profesionales que trabajan en esta área.

CAPÍTULO 1

TECNOLOGÍAS DE CUARTA GENERACIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La telefonía celular crece a pasos acelerados y las tecnologías involucradas también. Este enorme crecimiento se debe al protagonismo brindado por las tecnologías 3G en donde los usuarios ya podían manejar servicios de audio, imágenes y datos con redes basadas en las especificaciones propuestas por el *IMT-2000* (*International Mobile Telecommunications 2000* – Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000), el *3GPP* (*Third Generation Partnership Project* – Proyectos de Asociación para Tercera Generación) y el *3GPP2* (*3G Partnership Project Two* – Proyecto de Asociación de 3G No 2). Para tener una idea, las redes 3G están enfocadas en la transferencia de voz y datos con una velocidad aproximada de acceso de 384kbps y máxima o pico de 2Mbps, velocidad que no es suficiente para proporcionar accesos realmente multimedia.

Para poder mejorar los servicios prestados por las operadoras de telefonía móvil se plantea mejorar los servicios 3G y llevarlos a una evolución sin precedentes, ésta es la llamada tecnología 4G, en donde se podrá manejar transferencia de video en tiempo real con velocidades equivalentes a una *LAN* (*Local Area Network* – Red de área local) básica de 10 Mbps y mayores. La introducción de esta nueva tecnología inalámbrica no se da solamente como respuesta a la saturación del espectro radioeléctrico, sino con el objetivo de ofrecer a los usuarios, nuevos y mejores servicios de telecomunicaciones que necesiten mayores velocidades de transmisión, con acceso a *Internet* desde cualquier dispositivo móvil, en cualquier momento, en cualquier lugar. Por lo tanto, desaparecerán los límites entre comunicación, información, medios y entretenimiento; y se producirá una verdadera convergencia de servicios.

4G además brinda un gran cambio en la forma en que se mira la conectividad de hoy en día ya que en un futuro no muy lejano se hablará del “*Internet* de las

cosas”, es decir, una serie de equipos y aparatos electrónicos a nivel de oficina y de hogar se incorporan a la red móvil y se comunican de forma automatizada entre sí para conseguir que ciertos procesos del día a día se realicen de forma más inteligente y autónoma. Esto es posible gracias al gran ancho de banda que brinda 4G.

1.2 LA CONFUSIÓN CREADA ALREDEDOR DE 4G ^{[1]-[10]}

El problema de definir qué es 4G comienza cuando la operadora de telefonía celular para Europa y Estados Unidos, *T-Mobile*, implementa la tecnología *HSPA+* y la promociona como 4G para poder competir con empresas como *Sprint* y *Verizon* quienes se encontraban promocionando *WiMAX* y *LTE* como cuarta generación, cabe destacar que desde hace algún tiempo solo éstas eran consideradas 4G.

4G es un concepto comercial más que un estándar, lo que provoca diversas confusiones que comenzarán a ser resueltas cuando esta tecnología se masifique alrededor del mundo.

La diferencia entre la velocidad alcanzada por las redes *WiMAX* y *LTE* (es decir 4G); y la red *HSPA+* que fue considerada como tecnología 3.9G, no es sustancial, es por ello que la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) decidió incluir a *HSPA+* en la categoría de redes 4G y tras un comunicado de prensa realizado en Ginebra el 6 de Diciembre del 2010 en el Seminario Mundial de Radiocomunicaciones menciona lo siguiente:

“Tras efectuar una evaluación detallada en función de estrictos criterios técnicos y operativos, la UIT ha determinado que “LTE-Advanced” y “WirelessMAN-Advanced” han de incluirse oficialmente dentro de IMT-Advanced¹. Así existan tecnologías de punta actualmente definidas para las comunicaciones móviles

¹ El *IMT-Advanced* (*International Mobile Telecommunications Advanced* – Telecomunicaciones Móviles Internacionales Avanzadas) es una iniciativa de la UIT-R para definir las especificaciones que tendrán las tecnologías 4G, dentro de este marco las únicas tecnologías consideradas como 4G son *LTE-Advanced* y *WiMAX 2.0 IEEE 802.16m*.

inalámbricas en banda ancha mundiales, sólo las tecnologías que sean aceptadas por IMT-Advanced se considerarán "4G", sin embargo este término, aún por definir, también puede aplicarse a los antecesores de estas tecnologías: LTE y WiMAX, y otras tecnologías 3G evolucionadas, cuyo rendimiento y capacidades son sustancialmente superiores a los sistemas de tercera generación iniciales hoy implantados.²

Se hablaba de redes *WiMAX* con promedios de velocidad teóricos o pico superiores a los 50 Mbps, redes *LTE* con promedios de velocidad que superarían los 20 a 30 Mbps y con picos teóricos de velocidad que alcanzarían los 100Mbps, pero la realidad con las implementaciones comerciales de *4G* que se han visto en varias partes del mundo, incluyendo Europa y Estados Unidos, es que han sido sumamente inferiores a esos valores.

Como se puede apreciar, los argumentos que buscan dejar fuera de la categoría *4G* a *HSPA+* se basan más en una cuestión de nombres que de velocidad, ya que tampoco las redes *WiMAX* y *LTE* alcanzaron la velocidad que originalmente se fijó como el estándar para *4G*, es decir 100 Mbps.

La realidad alcanzada con *4G* en Estados Unidos se aprecia en la Figura 1.1. *Verizon*, *T-Mobile* y *Sprint* son los operadores de telefonía móvil más conocidos en ese país, por eso se han puesto en consideración para su análisis.

El objetivo es de 100 Mbps para un estándar *4G*, pero como se puede observar en el gráfico ningún operador lo logra, indistintamente de la tecnología celular empleada.

En la Figura 1.1 se puede observar que el promedio máximo de velocidad de conexión que alcanzan las redes *3.9G* y *4G* en Estados Unidos son 12, 8 y 6 Mbps. *Verizon* es el operador que ha apostado fuertemente por *LTE*, *Sprint* ha optado por *WiMAX* y *T-Mobile* por *HSPA+*.

² Fuente: http://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2010/48-es.aspx

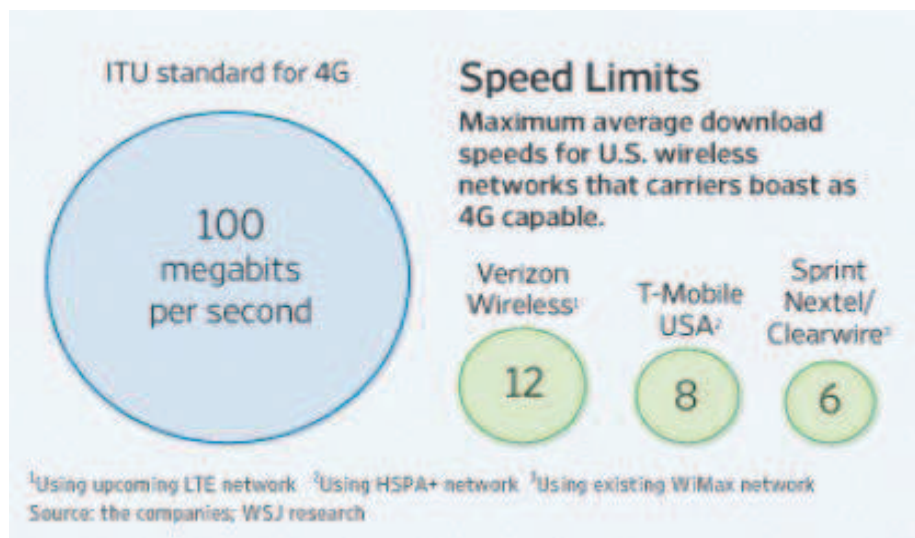


Figura 1.1. Velocidad 4G alcanzada en Estados Unidos ^[10]

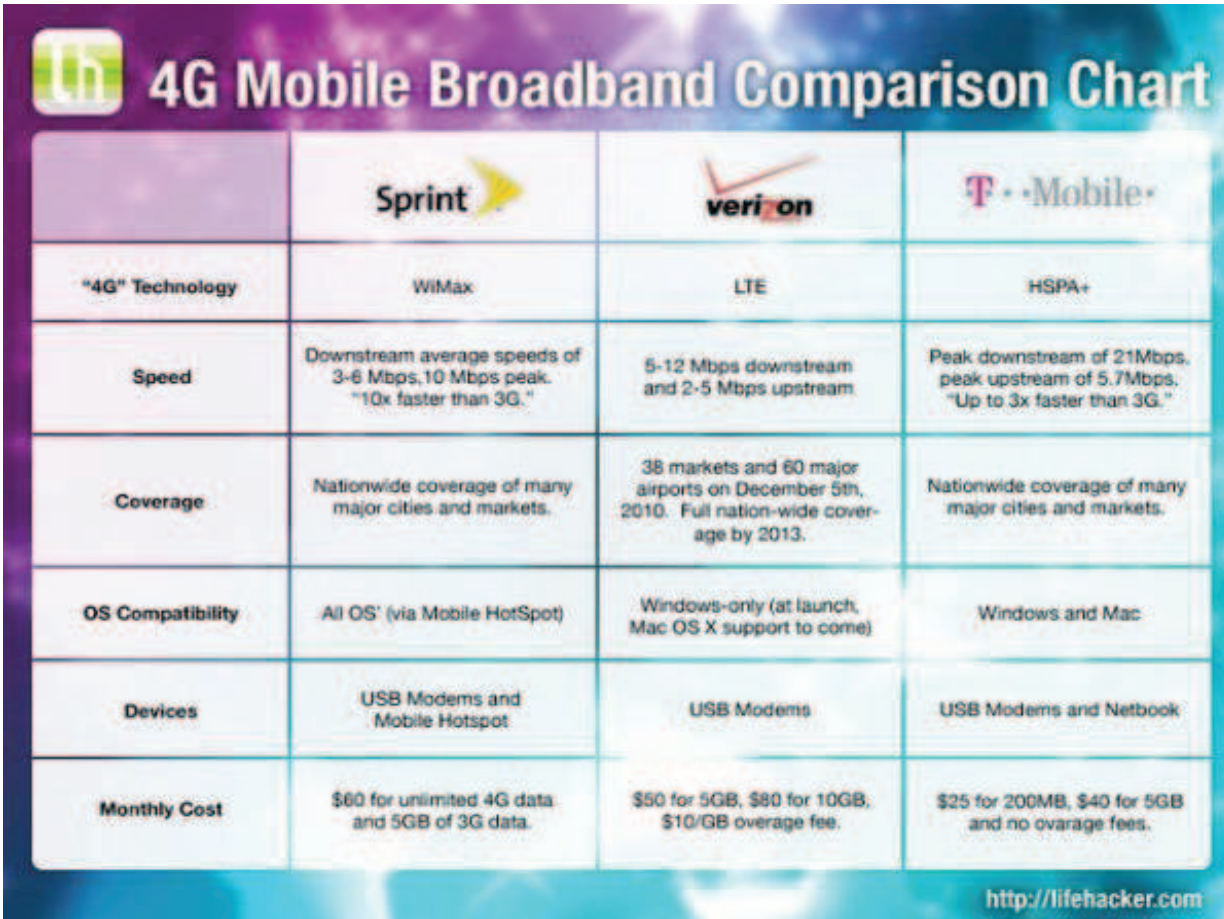
Dado que las velocidades de *LTE* y *WiMAX* realmente no son tan diferentes a las de *HSPA+*, la *ITU* permitirá que el estándar *HSPA+* sea reconocido como una tecnología 4G.

A continuación se presenta un resumen de las tecnologías denominadas 4G en Estados Unidos. La Figura 1.2 presenta varios parámetros para cada operador, entre ellos se encuentran, el tipo de tecnología usada, la velocidad de transmisión brindada, la cobertura de la red desplegada, la compatibilidad de la tecnología con los distintos sistemas operativos, los equipos de usuario que pueden ser usados para acceder a la tecnología celular y el costo mensual por el cual deberían pagar los usuarios el momento de usar los servicios de la red. Desde el punto de vista económico la opción brindada por *Verizon* con la tecnología *LTE* es la más costosa.

Esto explica por qué en Ecuador Telefónica Movistar comenzó a llamar a su red *HSPA+* como una tecnología 4G.

Para finalizar debe quedar claro que *LTE*, *WiMAX* y *HSPA+* son consideradas tecnologías 4G desde el punto de vista promocional y comercial, y que únicamente *WiMAX 2.0* y *Long Term Evolution Advanced* son tecnologías suficientemente evolucionadas, las cuáles de acuerdo a los parámetros impuestos

por *IMT-Advanced* son 4G, éstas aún no se disponen comercialmente y se encuentran en estudios y procesos de estandarización.



	Sprint	verizon	T-Mobile
"4G" Technology	WiMax	LTE	HSPA+
Speed	Downstream average speeds of 3-6 Mbps, 10 Mbps peak. "10x faster than 3G."	5-12 Mbps downstream and 2-5 Mbps upstream	Peak downstream of 21Mbps, peak upstream of 5.7Mbps. "Up to 3x faster than 3G."
Coverage	Nationwide coverage of many major cities and markets.	38 markets and 60 major airports on December 5th, 2010. Full nation-wide coverage by 2013.	Nationwide coverage of many major cities and markets.
OS Compatibility	All OS ¹ (via Mobile HotSpot)	Windows-only (at launch, Mac OS X support to come)	Windows and Mac
Devices	USB Modems and Mobile Hotspot	USB Modems	USB Modems and Netbook
Monthly Cost	\$60 for unlimited 4G data and 5GB of 3G data.	\$50 for 5GB, \$80 for 10GB, \$10/GB overage fee.	\$25 for 200MB, \$40 for 5GB and no overage fees.

<http://lifehacker.com>

Figura 1.2. Tecnologías 4G de distintos operadores ^[10]

1.3 EVOLUCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS CELULARES ^{[11], [18], [19]}

El cambio constante a través de los tiempos ha permitido que la telefonía celular haya evolucionado en tal magnitud que hoy en día ya se habla de redes celulares con tecnología 4G, por tal motivo a continuación se presenta una pequeña descripción del proceso evolutivo.

1.3.1 PRIMERA GENERACIÓN 1G

Esta generación se caracteriza por ser analógica y únicamente presta el servicio de comunicación por voz, los estándares más exitosos fueron *NMT* (*Nordic*

Mobile Telephone – Telefonía Móvil Nórdica) con especificaciones *NMT-450* y *NMT-900* usados en las bandas de frecuencia de 450 MHz y 900 MHz respectivamente, *TACS* (*Total Access Communications Systems* – Sistemas de Comunicaciones de Acceso Total) desplegado en Reino Unido operando en la banda de 900 MHz y *AMPS* (*Advanced Mobile Phone Service* – Sistema de Telefonía Móvil Avanzado) implementado en Estados Unidos en la banda de 800 MHz. En esta generación los dispositivos móviles eran enormes y pesados.

1.3.2 SEGUNDA GENERACIÓN 2G

A partir de esta generación la telefonía celular ya se digitaliza, dentro de las tecnologías que sobresalen se encuentran *GSM* (*Global System for Mobile Communications* – Sistema Global de Comunicaciones Móviles) que usa canales dedicados para ofrecer datos hasta 9.6Kbps (*full rate*), *D-AMPS* o *TDMA (IS-136)* la cual evolucionó a *PCS* (*Personal Communications Systems* – Sistemas de Comunicaciones Personales) que fue utilizada por Estados Unidos por un tiempo, *CDMA One (IS-95)* (*Code Division Multiple Access One*) y *PDC* (*Pacific Digital Communications* – *Comunicaciones Digitales del Pacífico*) de Japón. Los sistemas 2G tienen ciertas capacidades de transmisión de datos, por ejemplo incorporan *SMS* (*Short Message Service* – Servicio de Mensajes Cortos), pero fundamentalmente son sistemas que dan soporte a servicios de voz.

1.3.3 GENERACIÓN 2.5G

En esta generación destacan las tecnologías *HSCSD* (*High Speed Circuit Switced Data* – Circuitos Conmutados de Datos de Alta Velocidad), *GPRS* (*General Packet Radio Services* – Servicio General de Paquetes por Radio) con una velocidad de transmisión de 115 Kbps, *EDGE* (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution* – Velocidades Mejoradas de Datos para la Evolución de *GSM*) que permite alcanzar velocidades de transmisión de datos de hasta 384 Kbps, *EGPRS* (*Enhanced GPRS* – *GPRS* Mejorado) que es la unión de *GPRS* con *EDGE* y *ECSD* (*Enhanced-Switched Data* – Circuitos Conmutados de Datos Mejorados) que es la fusión de *EDGE* y *HSCSD*.

1.3.4 TERCERA GENERACIÓN 3G

La introducción de la tecnología inalámbrica 3G se da como respuesta a la saturación del espectro presentada por las tecnologías anteriores. 3G ofrece a los usuarios nuevos servicios de telecomunicaciones que necesiten mayores velocidades de transmisión. Estos nuevos servicios y especificaciones propuestos para la 3G se unieron con la creación del *IMT-2000*, *3GPP* y *3GPP2*.

Dentro de las propuestas para 3G, se plantea trabajar en las mismas bandas de frecuencia, y se pueden proporcionar velocidades de transmisión de 114 Kbps para usuarios de mucha movilidad, 384 Kbps para usuarios con movilidad limitada y 2 Mbps para usuarios sin movilidad. En el *IMT-2000* se propusieron una gran cantidad de sistemas basados en diferentes tecnologías pero dentro de estos estándares propuestos, fueron cuatro los que quedaron elegidos para la competencia, *UTRA-UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)*, *CDMA 2000* que se presenta en la tecnología *CDMA 2000 1xEV-DO* y que puede alcanzar velocidades de transmisión de 2.4 Mbps, *Enhanced-GSM* (que incluye: *HSCSD*, *EDGE*, *GPRS*) y *UWC-136 (Universal Wireless Communications – Comunicaciones Inalámbricas Universales)* que es la evolución del estándar *IS-136* basado en *TDMA* y que usa la tecnología *ATDMA (Advanced TDMA)*, los dos últimos se basan en tecnología similar. El estándar de mayor popularidad para 3G fue *UTRA-UMTS* y la tecnología dominante, *WCDMA*. Dentro de esta tecnología, aún se encuentran dos opciones: *FDD (Frequency Division Duplex)* y *TDD (Time Division Duplex)*. Los dos sistemas *UTRA-UMTS-WCDMA* Y *CDMA-2000* son los contendientes más importantes dentro del *IMT-2000*, por ello se crearon dos grupos: el *3GPP* y el *3GPP2*.

1.3.5 GENERACIÓN 3.5G Y 3.75G

La tecnología predominante en esta generación es la tecnología *HSPA* que se presenta como la unión de *HSDPA (3.5G)* y *HSUPA (3.75G)*. Alcanza velocidades de transmisión de 14.4 Mbps en el *dowlink* y 5.7 Mbps en el *uplink*.

1.3.6 CUARTA GENERACIÓN 4G

Se presentan como cuarta generación las tecnologías capaces de cumplir con las normas impuestas por el *IMT-Advanced*, éstas son: *LTE Advanced* y *WiMAX 2.0*. Anteriormente también estaba en competencia *UMB (Ultra Mobile Broadband)*, de *3GPP2* pero ante la predominancia de *LTE*, ésta abandona su desarrollo.

La característica principal de 4G es que está basada totalmente en *IP*, utiliza *OFDMA*³ (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) como técnica de acceso al medio y permite velocidades de transmisión de 1 Gbps en reposo y 100 Mbps en movimiento. Más adelante se verá que *LTE*, *Mobile WiMAX* y *HSPA+* también se pueden considerar como tecnologías 4G aunque anteriormente eran consideradas 3.9G.

A continuación se presenta un gráfico dónde se puede apreciar la evolución tecnológica que ha sufrido la telefonía celular con el pasar del tiempo.

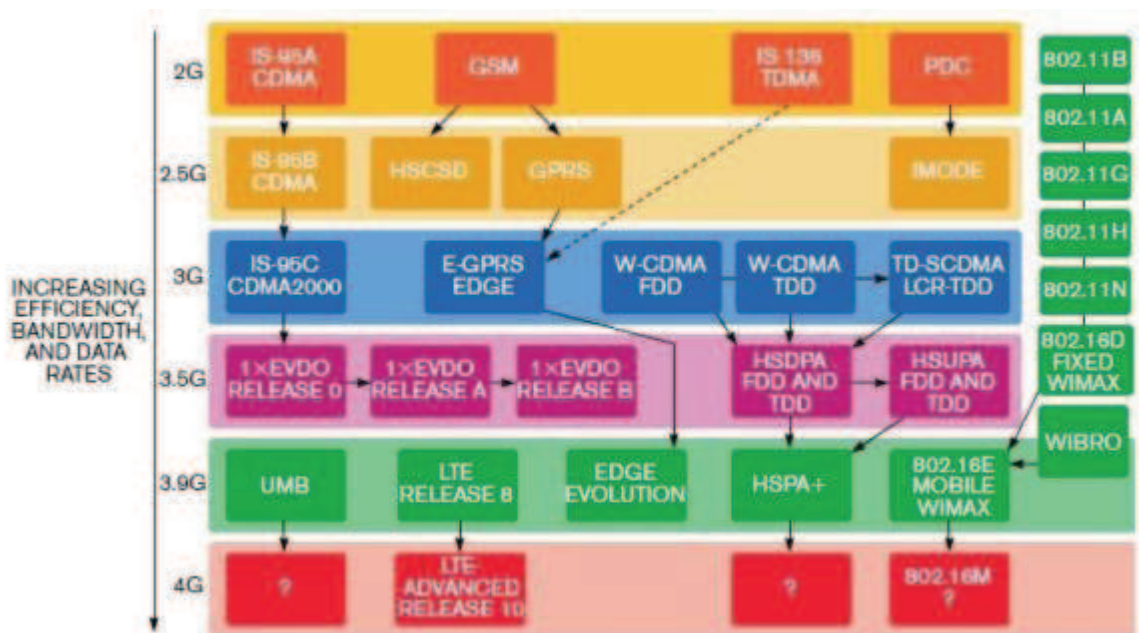


Figura 1.3. Evolución de las tecnologías celulares. ^[9]

³ OFDMA es una técnica de acceso basada en OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) que se utiliza en el *downlink* de *E-UTRAN* de *LTE*. Detalles de esta forma de acceso se presenta en la sección 2.5.2 del capítulo 2.

1.4 HSPA+: HIGH SPEED PACKET ACCESS PLUS ^{[12]-[17]}

HSPA+ es una tecnología superior a *3G UMTS*, *HSDPA* y *HSUPA*, conocida también como *Evolved HSPA* o *HSPA Evolution*, es una tecnología estandarizada por el *3GPP* en la versión 7. *HSPA+* está formada por las tecnologías *HSDPA* (3.5G) y *HSUPA* (3.75G), ambas estandarizadas por el *3GPP* en las versiones 5 y 6 respectivamente. Cabe indicar que *HSPA+* se soporta sobre las actuales redes *UMTS*.

Las velocidades de descarga más comunes en *HSDPA* son: 3,6 Mbps, 7.2 Mbps, y hasta de 14.4 Mbps, en tanto que la velocidad de subida es cercana a los 384 Kbps. *HSUPA* mantiene la velocidad de descarga de *HSDPA* y mejora la velocidad de subida hasta un valor de 5.7 Mbps donde los valores de 1.4 Mbps y 2 Mbps son los más comunes.

HSPA+ dentro de la versión 7 puede alcanzar velocidades de transmisión de bajada de 21 Mbps con modulación *64QAM*⁴ (*Quadrature Amplitude Modulation*), 28 Mbps con la misma modulación y técnicas avanzadas de antena *2x2 MIMO*⁵ (*Multiple-Input Multiple-Output*); y 11.5 Mbps en la velocidad de subida.

Existen planes de normalización y comercialización para mejorar y llevar a *HSPA+* aún más lejos. En la Figura 1.4 se presenta una evolución de esta tecnología, se puede ver claramente cómo se proyecta *HSPA+* hasta el 2012 con velocidades de descarga muy superiores a la versión 7. En principio toda esta evolución dependerá de la decisión que tomen las operadoras de telefonía celular ya que actualmente están optando por *LTE*.

Dentro de los objetivos perseguidos se puede mencionar que *HSPA+* busca:

⁴ *64QAM*: La modulación *64QAM* involucra la variación simultánea de la amplitud y fase de la portadora, cada 6 bits de entrada, proporcionan 64 estados de modulación únicos.

⁵ *MIMO*: Es una tecnología que aprovecha la propagación multicamino para incrementar la eficiencia espectral del sistema de comunicaciones inalámbrico a través del uso de diversidad de antenas, distintas técnicas y complejos algoritmos de tratamiento digital de señales en ambos extremos del enlace: extremo transmisor (múltiple entrada) y extremo receptor (múltiple salida).

- Facilitar la migración de la infraestructura de *HSPA* a *HSPA+*.
- Proporcionar compatibilidad con los sistemas anteriores sin incurrir en ninguna degradación en el rendimiento, es decir *HSPA+* es compatible con las versiones *R'99*, *R'5*, *R'6* del *3GPP*.
- Proporcionar y suavizar el interfuncionamiento entre redes *HSPA+* y *LTE* para facilitar la operación de ambas tecnologías.
- Explotar todo el potencial de un enfoque *CDMA* antes de trasladarse a una plataforma de *OFDM* en *3GPP LTE*.
- Lograr un rendimiento comparable al de *LTE* en 5 MHz de espectro.

HSPA+ aplicará algunas de las técnicas desarrolladas por *LTE* permitiendo a los operadores extender su tiempo de vida ya que ofrece un rendimiento impresionante.

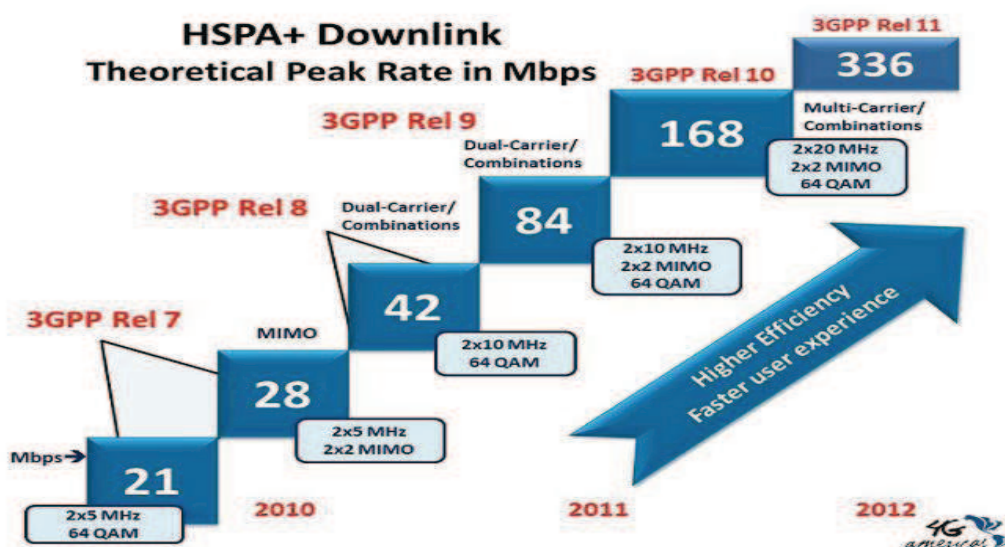


Figura 1.4. Pasos evolutivos de las redes *HSPA+* ^[12]

"HSPA+ también introduce una arquitectura opcional *All-IP*, donde las estaciones base están directamente conectadas a nodos *IP* y luego a los routers de frontera que tienen conexión con los *ISPs*. La tecnología también ofrece importantes mejoras en la vida útil de las baterías y una reconexión rápida a la red, después

de un tiempo de inactividad (idle time), entregando una verdadera sensación de que el UE⁶ siempre está conectado”.⁷

En la Figura 1.5 se puede apreciar la evolución de la tecnología 3GPP.

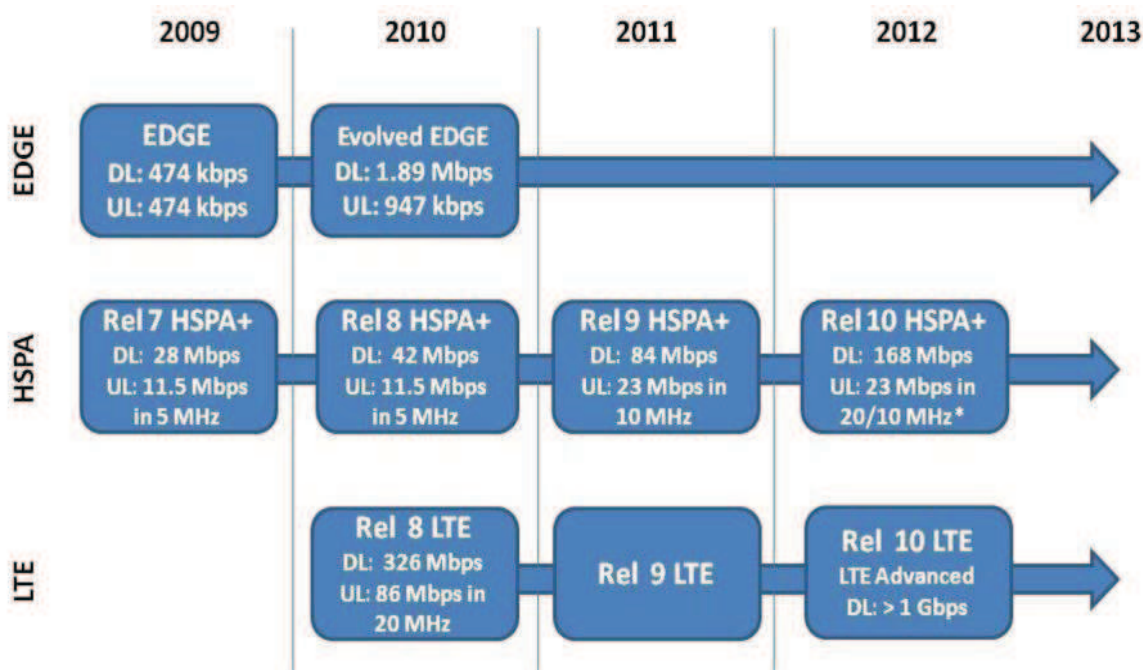


Figura 1.5. Evolución de la Tecnología 3GPP^[15]

1.4.1 BANDAS DE FRECUENCIA

El espectro utilizado por *HSPA+* es el mismo que el usado por los servicios móviles 3G, 3.5G y 3.75G, es decir, la UIT asignó las bandas de frecuencia 1885-2025 Mhz y 2110-2200 Mhz para *IMT-2000* y posteriormente asignó bandas adicionales. El espectro asignado a *IMT-2000* no solo incluye servicios móviles terrestres, sino también atribuciones para servicios móviles satelitales (*SMS*).

⁶ UE (*Unit Equipment* – Equipo de usuario).- Es el equipo terminal del usuario formado por el equipo móvil y por la tarjeta de identificación de abonado.

⁷ Fuente: ORTIZ, Diego; ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS DE BANDA ANCHA PARA ACCESO A INTERNET, HSPA (HIGH SPEED PACKET ACCESS) Y WiMAX (802.16e-2005); Proyecto de titulación, EPN, Quito 2010.

Hay que tener en cuenta que las frecuencias celulares no las asignan los operadores, sino los entes reguladores y técnicos de telecomunicaciones de cada país en cuestión, pero éstos se basan en recomendaciones determinadas por los organismos reguladores internacionales.

1.4.2 COBERTURA

En la Figura 1.6 se resume la cobertura de *HSPA* y *HSPA+* a nivel mundial.

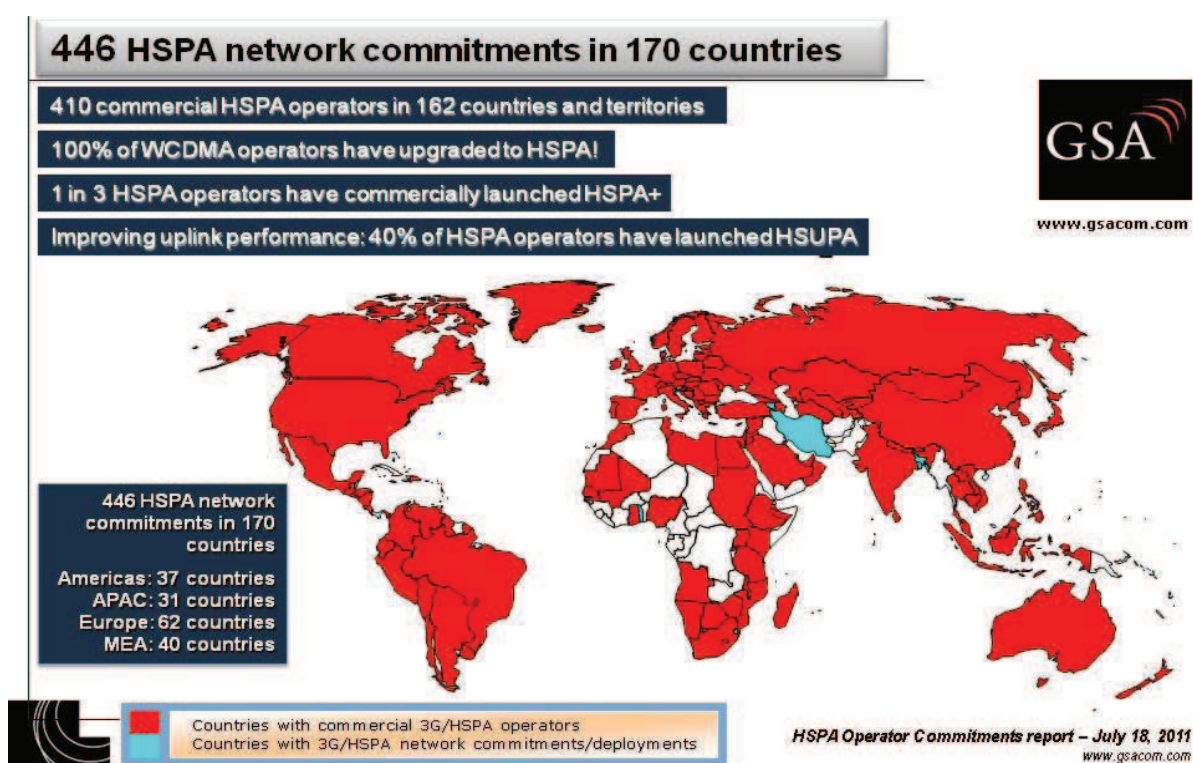


Figura 1.6. Redes desplegadas de *HSPA* y *HSPA+* en el mundo ^[15]

1.4.3 SERVICIOS

HSPA+ soporta varias aplicaciones que los usuarios están demandando actualmente y gracias a la banda ancha que ofrece, se puede soportar varios servicios, entre los principales se tiene: Voz sobre *IP*, videoconferencia, juegos en línea, *video streaming* y televisión. Mediante esta tecnología se puede introducir

en el mercado el llamado “*Triple play*”, es decir, TV, acceso a *Internet* y telefonía, y todo esto en movilidad.

1.4.4 EQUIPOS TERMINALES

La Tabla 1.1 presenta dos columnas, la primera indica el número de dispositivos que se lanzaron desde febrero del 2011 hasta enero del 2012 y la segunda columna muestra el tipo de dispositivos lanzados para las redes *HSPA* y *HSPA+*.

No. de dispositivos	Tipo de dispositivos
1,413	Mobile phones including smartphones
580	USB modems
502	Notebooks, netbooks
434	Wireless routers/gateways, mobile hotspots
295	PC data cards (PCMCIA cards, ExpressCards, embedded modules)
48	Personal Media Players, UMPCs
27	Femtocells
12	E-book readers
8	Cameras
43	Mobile tablets
Total 3,362	(January 24, 2012: GSA HSPA Devices survey) © Global mobile Suppliers Association (GSA)

Tabla 1.1. Número de dispositivos lanzados al mercado para redes *HSPA* y *HSPA+*. ^[16]

1.5 TECNOLOGÍA *WiMAX* ^{[18]-[26]}

WiMAX son las siglas de *Worldwide Interoperability for Microwave Access* – Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas, esta tecnología está diseñada para proveer servicios y aplicaciones de banda ancha inalámbrica tanto fija como móvil. *WiMAX* es la primera tecnología de banda ancha móvil basada en *IP* y *OFDMA*.

A continuación se realizará una breve síntesis de *WiMAX*.

1.5.1 EL ESTÁNDAR IEEE 802.16 Y SUS VERSIONES

La *IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)* es una organización que ha definido varios estándares inalámbricos a nivel mundial. Cada estándar está asociado a una tecnología distinta. Existen estándares inalámbricos para redes de Área Personal *WPAN* (802.15), redes de Área Local *WLAN* (802.11), redes de Área Metropolitana *WMAN* (802.16) y redes de Área Amplia *WWAN* (802.20).

Todo inició cuando se formó el grupo de trabajo *IEEE 802.16* en 1998, para dar una solución y crear un estándar para sistemas inalámbricos de banda ancha de área metropolitana (*WMAN*). Se inició de este modo el desarrollo de la tecnología *WiMAX* basada en las normas promulgadas por *IEEE 802.16* y que posteriormente se convertiría en una nueva tecnología inalámbrica. Complementariamente, tiempo después, se crea el *WiMAXForum*, organismo responsable de certificar el cumplimiento del estándar y la interoperabilidad entre equipos de distintos fabricantes.

El estándar *802.16* comenzó con el reto de conseguir comunicaciones inalámbricas *WMAN* sin necesidad de línea de vista (*NLOS*). En el año 2001 fue promulgada la primera versión del estándar en la frecuencia de operación de 2 a 11 GHz, *Wireless MAN-SC*, con una portadora única. En el año 2003, se presentó la versión *IEEE 802.16a* con tres esquemas de acceso: portadora única (*Single carrier, SC*), *OFDM* y *OFDMA*. Las dos últimas versiones presentadas y publicadas fueron: *IEEE 802.16-2004 (802.16d)*, *WiMAX Fijo* e *IEEE 802.16-2005 (802.16e)*, *WiMAX Móvil*. Finalmente se encuentra en proceso de estandarización la nueva versión de *WiMAX Móvil*, *IEEE 802.16m*, conocida como *WiMAX 2.0*, la cual será capaz de ofrecer una velocidad teórica pico máxima de 1 Gbps en reposo y de 100 Mbps en movimiento, será compatible con versiones anteriores *WiMAX* y entrará a formar parte de las tecnologías *4G IMT-Advanced*.

La Figura 1.7 muestra cómo *WiMAX* ha ido evolucionando con el pasar del tiempo hasta constituirse hoy en día en un estándar más de la telefonía celular a nivel mundial.

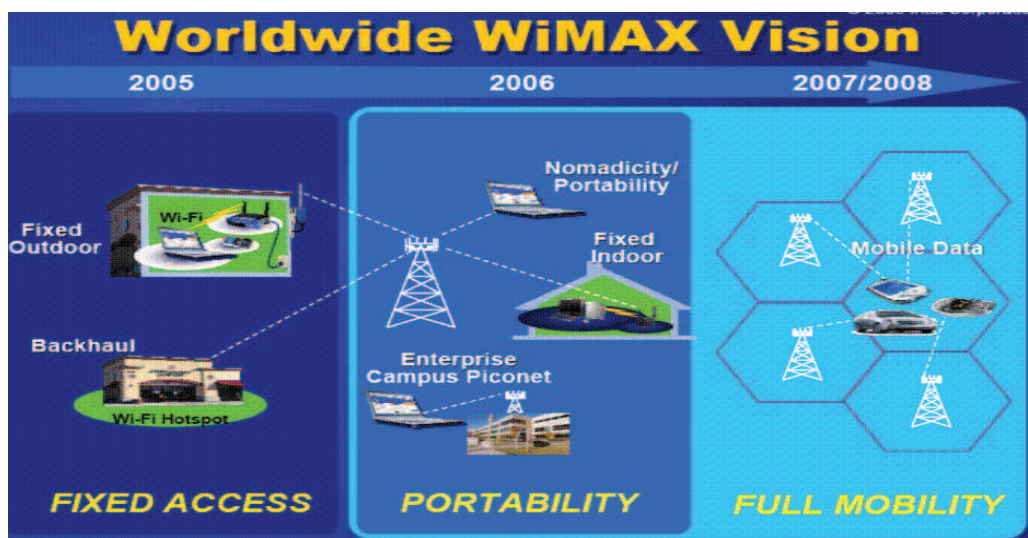


Figura 1.7. Evolución de *WiMAX* ^[25]

1.5.2 ESPECTRO DE FRECUENCIA ^[22]

WiMAX puede trabajar en bandas de frecuencia con licencia y sin licencia. Dentro de las bandas licenciadas se encuentran: la banda de 3.5GHz, la misma que tiene un ancho de banda de 300 MHz para el rango de 3.3 a 3.6 GHz; la banda WCS (*Wireless Communication Service*) que presenta dos bandas de 15 MHz que van de 2305 a 2320 y de 2345 a 2360 MHz; y la banda MMDS (*Multichannel Multipoint Distribution Service*), la cual incluye 31 canales de 6 MHz en el rango de 2500 a 2690 MHz. Las bandas no licenciadas son las bandas ISM (*Industrial-Scientific-Medical*) comprendidas de la siguiente manera: 902 – 928 MHz, 2.4 – 2.4835 GHz, 5.725 – 5.85 GHz y la banda UNII (*Universal Networking Information Infrastructure*) la cual se divide en cuatro rangos 5150 – 5250 MHz, 5250 – 5350 MHz, 5470 – 5725 MHz y 5725 – 5850 MHz.

Las bandas de frecuencia que utiliza *WiMAX* Fijo son 3.5 y 5.8 GHz y *WiMAX* Móvil 2.3 y 2.5 GHz, estas bandas son las más probables para el despliegue de *WiMAX*.

La Figura 1.8 muestra el espectro utilizado por la tecnología *WiMAX*.

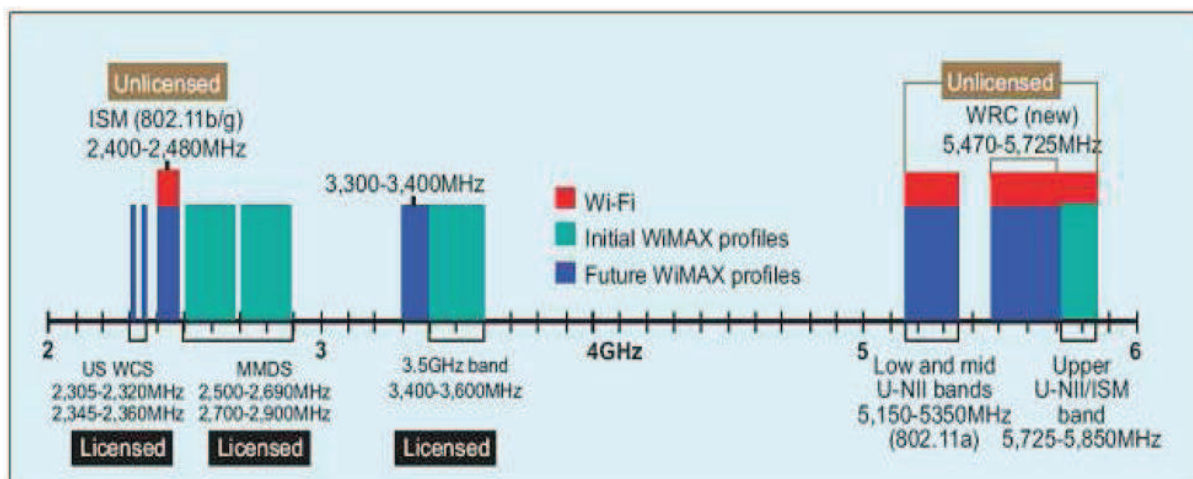


Figura 1.8. Espectro utilizado por la Tecnología WiMAX^[22]

En la tabla 1.2 se presentan las bandas de frecuencia en las que puede operar WiMAX, definiendo para cada banda: licencia, línea de vista y tipo de acceso.

BANDA DE FRECUENCIA	LICENCIA	LOS / NLOS	TIPO DE ACCESO
10 - 66 [GHz]	No	LOS	Fijo
< 11 [GHz]	Si	NLOS y LOS a distancias cortas	Fijo
5 - 6 [GHz]	No	NLOS	Fijo y nómada
2 - 6 [GHz]	Si	NLOS	Fijo y Móvil

Tabla 1.2. Bandas de frecuencia para IEEE 802.16^[18]

A continuación se presenta una descripción general del estándar 802.16e y 802.16m en el cual se basa Mobile WiMAX y WiMAX 2.0 respectivamente. Cabe recalcar que de acuerdo a la ITU, Mobile WiMAX puede ser considerada 4G ya que es una tecnología próxima a evolucionar a WiMAX 2.0 aunque éste es un argumento que no concuerda necesariamente con las normas IMT-Advanced.

1.5.3 COBERTURA

WiMAX al ser inicialmente una tecnología inalámbrica de acceso fijo fue una de las primeras soluciones para brindar conectividad inalámbrica de banda ancha en sectores donde se dificultaba la transmisión de información a través de cables. Es por ello que desde este punto de vista *WiMAX* se utiliza a nivel mundial; a continuación se presenta una tabla en la que se muestra el radio de cobertura que ofrece *WiMAX* en sus distintas versiones.

	802.16	802.16a	802.16e
Radio de cobertura de una celda típica	2 – 5 km aprox.	5 – 10 km aprox.	2 – 5 km aprox.

Tabla 1.3. Cobertura de *WiMAX* ^[28]

A nivel de tecnología celular como tal, *WiMAX* en su versión 2.0 aún no se encuentra desplegado a nivel mundial ya que todavía se encuentra en pruebas tanto a nivel de red como de dispositivos de usuario y es por ello que no se presenta una gráfica de los países donde estaría operando.

1.5.4 MOBILE WIMAX IEEE 802.16e

En el año 2005 se desarrolló la versión de *WiMAX* Móvil, más conocido como *Mobile WiMAX* basándose en el estándar 802.16e-2005. Presenta movilidad, con velocidades de transmisión de hasta 15 Mbps en frecuencias inferiores a 6 GHz. Este estándar aparece como una mejora al estándar 802.16d-2004 y permite la operación combinada de aplicaciones fijas y móviles para bandas de frecuencia con licencia. Permite el desplazamiento del usuario de un modo similar al que se presenta en *GSM/UMTS*, actualmente compite con la tecnología *LTE* versión 8. La mitad de la revisión 802.16e trata sobre la capa física *OFDMA*, que se adapta para incorporar la movilidad. Hay que señalar que se introducen modificaciones en la capa *MAC* y en el resto de modalidades de la capa física.

1.5.4.1 Características relevantes de Mobile WiMAX

En esta sección se presentan las características representativas de la capa física (*PHY*) y la capa de acceso al medio (*MAC*) que permiten a *WiMAX* Móvil ser una tecnología fuerte, fiable y adaptable a cualquier ambiente gracias al gran número de opciones que ofrece y que se mencionan a continuación.

Capa física (*PHY*):

- La capa física está basada en OFDM, un esquema que ofrece una buena resistencia al efecto multicamino (*multipath*) incluso en condiciones *NLOS*.
- OFDMA es una técnica utilizada por *WiMAX* móvil para el acceso múltiple aprovechando la diversidad multiusuario donde cada usuario es asignado a una serie de subportadoras o subcanales.
- Elevadas tasas de transmisión pico gracias a las técnicas de modulación y codificación adaptativa, uso de múltiples antenas y multiplexación espacial. Por ejemplo, utilizando un ancho de banda de 10 MHz y el esquema de dúplex TDD de 3:1 (3 tramas *downlink* - 1 trama *uplink*) la velocidad máxima en capa física es aproximadamente 25 Mbps para *downlink* y 6.7 Mbps para *uplink*.
- Velocidad y ancho de banda escalables, esta característica es única para *IEEE 802.16e-2005* con el modo escalable *OFDMA*. Permite adaptar la velocidad con el ancho de banda del canal disponible, esto implica que habrán más subportadoras en el canal, obteniendo así un aumento en las velocidades de transmisión.
- Utiliza modulación y codificación adaptativa teniendo en cuenta la *SNR* (Relación Señal a Ruido) que el receptor recibe en un instante de tiempo. El término adaptativa, significa utilizar la mejor modulación y/o codificación para cada subtrama de usuario y de esta manera mejorar notablemente la velocidad de transmisión.

- Soporte para técnicas de múltiples antenas. *WiMAX* permite incorporar antenas adicionales al transmisor/receptor. La velocidad se aumenta gracias a las técnicas de antenas avanzadas tales como: conformación de haz, codificación en espacio-tiempo y multiplexación espacial.

Capa de acceso al medio (MAC):

- *WiMAX* Móvil utiliza la técnica *ARQ (Automatic Repeat Request)* para retransmisiones en la capa de enlace. También posibilita la combinación entre *FEC (Forward Error Correction)* y *ARQ* es decir *ARQ-Hybrid*.
- *IEEE802.16e-2005* soporta dúplex *FDD⁸ (Frequency-Division Duplexing)* y *TDD⁹ (Time-Division Duplexing)*. *TDD* será el dúplex para el futuro de *WiMAX* ya que tiene mejor eficiencia espectral, con el uso de *TDD* los enlaces pueden ser asimétricos lo que permite mayor flexibilidad para escoger las velocidades de *uplink* y *dowlink*, se aprovechan de mejor manera los recursos del canal asignado y los equipos no son tan complejos.
- La asignación de ancho de banda a los usuarios en los canales de bajada y subida, es controlado desde la estación base gracias a *software*.
- La capa *MAC* tiene una arquitectura orientada a conexión que está diseñada para soportar varias aplicaciones, incluyendo servicios de voz y multimedia con múltiples conexiones. La *QoS* de *WiMAX* ofrece tasa de bits constante, tasa de bits variable, flujo de tráfico en tiempo no real, y tráfico de datos *best-effort* de manera que permite adaptarse a los requerimientos *QoS* de cada conexión de usuario.
- *WiMAX* móvil incluye una serie de mecanismos que permiten al usuario mantener una conectividad móvil, eficiente y muy robusta para aplicaciones tolerantes a los retardos tales como *VoIP*, especialmente en cambios de

⁸ *FDD*: Emplea un método para dividir el ancho de banda entre lo que es *upstream* y *downstream*.

⁹ *TDD*: Permite que un solo canal sea usado tanto para *upstream* como para *downstream* utilizando diferentes ranuras de tiempo.

estación base (*handover*), también se especifican en el soporte para aplicaciones móviles técnicas como estimación de canales de frecuencia, ahorro de potencia, subcanalización de *uplink* y control de potencia.

1.5.5 WiMAX 2.0 IEEE 802.16m.

La futura generación de *WiMAX* Móvil es *WiMAX 2.0*, tecnología que obedece a las normas del estándar *IEEE 802.16m*. Esta tecnología hará posible la transferencia de datos de manera inalámbrica a tasas teóricas de alrededor de 1 Gbps en reposo y 100 Mbps en movimiento, requisitos establecidos por el estándar global que acoge a las futuras tecnologías de cuarta generación (*4G*), *IMT-Advanced*. *WiMAX 2.0* soportará un extenso rango de aplicaciones y servicios de gran calidad y capacidad sobre *IP*, además, deberá mantener total compatibilidad con las versiones antiguas de *WiMAX*.

1.5.5.1 Características principales de IEEE 802.16m

Dentro de los aspectos más destacados de *IEEE 802.16m* se pueden mencionar:

- *Soporte para alta movilidad*: Gracias a la adaptación al enlace, retardos menores en el acceso y mejor funcionamiento en el *handover*.
- *Alta eficiencia espectral y grandes tasas de transmisión pico*: La eficiencia espectral en el *uplink* y en el *dowlink* son 15 y 6,75 bps/Hz usando configuraciones de antena *MIMO 4 x 4* y *2 x 4*, respectivamente.
- *Antenas MIMO*: Técnicas avanzadas con capacidades de flujo único y multi-flujo para cada usuario.
- *Mayor eficiencia, menor sobrecarga y menores tiempos de latencia*: Esto conlleva a un incremento en la capacidad del sistema.
- *Reducción del consumo de potencia* del dispositivo móvil.

Otros aspectos que integra la tecnología *WiMAX 2.0* son:

- Uso de esquemas de transmisión bidireccional en tiempo y en frecuencia.
- Posibilidad de adaptarse a las diferentes clases de bandas *IMT* (de 450 a 3600 MHz).
- Soporte para multiportadora y anchos de banda de hasta 100 MHz a través de la agregación de canales de radiofrecuencia.
- Multi-radios para el mismo terminal de usuario minimizando la interferencia entre radios y las interrupciones de la comunicación.
- Habilita los trasposos de comunicación entre distintas frecuencias y tecnologías de acceso.
- Mejora del rendimiento de las aplicaciones y servicios ofrecidos.

En la Tabla 1.4 se describen las características principales de *IEEE 802.16m*.

Frecuencia portadora	Banda con licencia por debajo de 6GHz
Ancho de banda	5-20 MHz (superior a 100 MHz con la técnica de agregación de bandas).
Dúplex	Full-duplex, half-duplex <i>FDD</i> , <i>TDD</i>
Antenas	Enlace descendente ≥ 2 TX, 2 RX Enlace ascendente ≥ 1 TX, 2 RX
Latencia de la capa de datos	< 10ms
Latencia de la capa de control	< 100 ms
Tiempo de traspaso	Intrafrecuencia < 30 ms Interfrecuencia < 100 ms
Eficiencia espectral	2 – 4 bps/Hz (depende de la distancia entre estaciones base)
Movilidad	Velocidades de hasta 500 km/h con rendimiento óptimo para velocidades hasta 10 km/h
Eficiencia espectral por sector (bps/Hz/sector)	Enlace descendente: 2.6 Enlace ascendente: 1.3
Eficiencia espectral por	Enlace descendente: 0.26

usuario (bps/Hz)	Enlace ascendente: 0.13
Eficiencia espectral en el borde de la celda (bps/Hz)	Enlace descendente: 0.09 Enlace ascendente: 0.05
Capacidad para Voz sobre IP (VoIP) (llamadas activas/MHz/sector)	Enlace descendente: 30 Enlace ascendente: 30

Tabla 1.4. Características principales de *IEEE 802.16m* ^[24]

1.5.6 APLICACIONES Y SERVICIOS DE WiMAX ^{[23], [24], [27]}

La tecnología *WiMAX* se enfoca en proporcionar enlaces de alta velocidad punto-punto, punto-multipunto, servicios de conexión de redes fijas ya existentes y servicios de telefonía celular. Ofrece servicios de banda ancha a usuarios finales, tanto en aplicaciones *indoor* como aplicaciones *outdoor*. La Figura 1.9 es muestra de lo mencionado anteriormente, en esta figura se puede apreciar las aplicaciones y servicios que permite *WiMAX*.

Así, de manera general, *WiMAX* presenta los siguientes servicios y aplicaciones:

- Ofrece servicios de banda ancha a zonas geográficas alejadas o rurales de difícil acceso.
- *WiMAX* es una alternativa de conexión al cable y al *xDSL* para que los usuarios residenciales puedan tener acceso a Internet de banda ancha.
- *WiMAX* es una solución para implementar conexiones empresariales permitiendo la comunicación de las sucursales de las empresas. *WiMAX* puede usarse como una red de transporte, sobre la que se puede transportar *IP*, *T1/E1*, *Ethernet*, lo que la hace perfectamente adecuada para redes corporativas de voz, datos, así como también para operadores de telecomunicaciones. *WiMAX* también se usa para unir los *hot spots* (puntos de acceso inalámbrico a Internet) *WiFi* a las redes de los operadores.

- *WiMAX* Móvil permite a los usuarios conectarse con cualquier dispositivo que soporte la tecnología, sean éstos *PDA*s, celulares, portátiles, etc y navegar por *Internet* o en la *intranet* dentro del área de cobertura de la red *WiMAX*. Es decir existe conectividad de banda ancha en movimiento.
- *WiMAX* Móvil puede ofrecer una variedad de aplicaciones tales como *VoIP*, *streaming* de audio y video, TV móvil, mensajería instantánea, etc. Para ofrecer todo este tipo de aplicaciones, los fabricantes han proporcionado al mercado varios tipos de dispositivos móviles.
- Adicionalmente *WiMAX* tiene la capacidad de inter-operar con redes *3GPP*, *3GPP2* y *PSTN*.

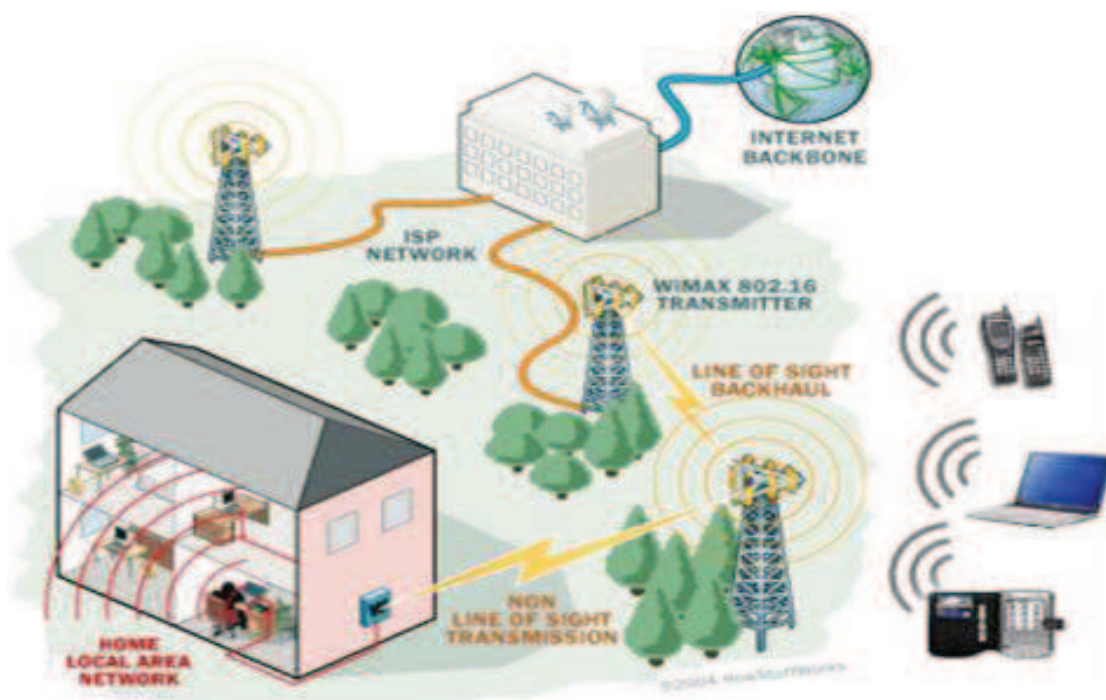


Figura 1.9. Aplicaciones de *WiMAX* ^[26]

1.5.7 EQUIPOS TERMINALES ^[21]

Dentro de los equipos terminales que pone a disposición la tecnología *WiMAX* para uso del usuario se pueden mencionar, laptops, *PDA*s, *Tablets*, celulares,

módems *USB* y tarjetas inalámbricas. La Figura 1.10 muestra varios dispositivos creados por distintos fabricantes.



Figura 1.10. Dispositivos *WiMAX* ^[21]

1.6 LTE y LTE ADVANCED

La próxima generación de la tecnología celular alterará el escenario de las comunicaciones, cambiando la forma en que las personas acceden a la información e interactúan con otras. La nueva tecnología es *LTE*, la Evolución a Largo Plazo de *UMTS*, desarrollada por el *3GPP*. *LTE* promete a los consumidores un nuevo nivel en el acceso a la banda ancha móvil. Con *LTE* la

red de operadores alcanza una gran eficiencia operacional permitiendo que los costos de servicio se reduzcan. Por otro lado, *LTE Advanced* será el siguiente paso de *LTE* como sistema *4G* que cumplirá con los requisitos impuestos por el *IMT-Advanced*.

Para tener una idea general del comportamiento de las tecnologías en cuestión, *LTE* se encuentra estandarizado en la versión 8 del *3GPP* y *LTE-Advanced* en la versión 10. A modo de resumen se puede mencionar que la arquitectura de red de ambas tecnologías está formada por una arquitectura *E-UTRAN*, una arquitectura *EPC*, una arquitectura *IMS* y el equipo de usuario.

Con respecto a las tecnologías de acceso y nivel físico, *LTE* utiliza esquemas de acceso *OFDMA* para el enlace descendente, *SC-FDMA* para el enlace ascendente e incorpora técnicas avanzadas de antenas *MIMO*, gracias a estas características y a un ancho de banda máximo de 20 MHz es posible alcanzar velocidades de transmisión teóricas de 100 Mbps de bajada y 50 Mbps de subida.

Por su parte *LTE-Advanced* introduce un nuevo concepto denominado agregación de portadora para utilizar un ancho de banda de 100 MHz, utiliza *OFDMA* para el *downlink*, *clustered SC-FDMA* para el *uplink* y técnicas *MIMO* mejoradas, lo que permite que esta tecnología permita brindar velocidades de transmisión teóricas que bordean los 1 Gbps para el enlace descendente y los 500 Mbps para el enlace ascendente.

Finalmente cabe mencionar que *LTE* y *LTE Advanced* se estudiarán a profundidad en los capítulos dos y tres respectivamente por lo que cualquier duda con respecto a los distintos términos utilizados en este apartado se aclararán más adelante en los capítulos y subtemas correspondientes.

REFERENCIAS DEL CAPÍTULO I

- [1] ITU Redefines 4G. Again.
<http://www.pcmag.com/article2/0,2817,2374564,00.asp>

- [2] McCann-Erickson denuncia a Claro Chile por publicidad engañosa.
<http://www.wayerless.com/2012/02/mccann-erickson-denuncia-a-claro-chile-por-publicidad-enganosa/>

- [3] De la A a la Z: Lo que debes saber acerca de 4G
<http://www.wayerless.com/2012/02/de-la-a-a-la-z-telefonía-movil-4g/>

- [4] Entel: “Tenemos una red más evolucionada pero no diremos que es 4G, porque no es 4G”
<http://www.wayerless.com/2012/02/entel-tenemos-una-red-mas-evolucionada-pero-no-diremos-que-es-4g-porque-no-es-4g/>

- [5] El Seminario Mundial de Radiocomunicaciones de la UIT se centra en las tecnologías de comunicaciones del futuro.
http://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2010/48-es.aspx

- [6] La UIT define las comunicaciones móviles del futuro.
http://www.itu.int/newsroom/press_releases/2007/30-es.html

- [7] Normas de las IMT-Avanzadas para comunicaciones móviles de banda ancha.
<https://itunews.itu.int/Es/2220-Normas-de-las-IMT-Avanzadas-para-comunicaciones-moviles-de-banda-ancha.note.aspx>

- [8] Tecnología 4G, la nueva evolución de la telefonía celular.
http://www.tendencias21.net/Tecnología-4G-la-nueva-evolucion-de-la-telefonía-celular_a4423.html

- [9] Telefonía móvil: Rumbo al 4G.
<http://www.neoteo.com/telefonía-movil-rumbo-al-4g-15511>
- [10] ITU se retracta: 4G es HSPA+, LTE y WiMAX.
<http://www.poderpda.com/editorial/itu-retracta-4g-es-hspa-lte-y-wimax-mexico-con-4g/>
- [11] FIGUEROA DE LA CRUZ, Mario. *Introducción a los sistemas de telefonía celular*. Editorial Hispano Americana HASA. Argentina 2009.
- [12] HSPA, HSDPA, HSUPA, HSPA+.
<http://wiki.bandaancho.st/HSPA>
- [13] HSPA+
<http://es.wikipedia.org/wiki/HSPA%2B>
- [14] HSPA+: High Speed Packet Access Plus.
<http://www.4gamericas.org/index.cfm?fuseaction=page§ionid=248>
- [15] HSDPA deployments world map.
<http://www.gsacom.com/news/statistics.php4>
- [16] HSPA Devices survey – January 24, 2012: Key Findings
http://www.gsacom.com/gsm_3g/info_papers
- [17] 3GPP Technology Evolution
<http://www.4gamericas.org/index.cfm?fuseaction=page&pageid=1086>
<http://www.4gamericas.org/UserFiles/image/Webpage%20Graphics/Migration%20to%204G%20RysavyResearch.jpg>
- [18] ORTÍZ, Diego. *Análisis comparativo de las tecnologías inalámbricas de banda ancha para acceso a Internet, HSPA (High Speed Packet Access) y WiMAX (802.16e-2005)*. Ecuador 2010.

- [19] POZO, Mayra. *Estudio de la interoperabilidad de la tecnología inalámbrica: WiMAX (Anexo E-2005) del estándar IEEE 802.16 con la red celular de tercera generación: GSM (UMTS)*. Ecuador 2010.
- [20] PROAÑO, Tito; RODRÍGUEZ, Ernesto. *Análisis comparativo del servicio de internet móvil brindado a través de 3G (UMTS) versus la opción brindada por el anexo "e" del estándar IEEE 802.16 (WIMAX MÓVIL)*. Ecuador 2007.
- [21] MARCANO, Diógenes. *WiMAX Móvil y 4G*. Atel Asesores. Caracas 2009. www.atelasesores.com.ve
- [22] QUILUMBANGO, Oscar. *Material didáctico para el análisis y simulación del desempeño de la capa física de WiMAX/IEEE 802.16, usando la interfaz gráfica de MATLAB (GUI)*. Ecuador 2011.
- [23] ANDRADE, Juan. *Análisis del comportamiento de la tecnología WiMAX (IEEE 802.16) y WiMAX Mobile (IEEE IEEE 802.16E) con tráfico de voz y datos en varios escenarios, usando el simulador NS-2*. Ecuador 2011.
- [24] VILLAR, Sonia. *Red de Acceso de Banda Ancha mediante WiMAX Móvil (IEEE 802.16e)*. Madrid 2010.
- [25] WiMAX & the Spectrum Wars
<http://jellyfishcoolman.wordpress.com/2009/07/19/wimax-the-spectrum-wars/>
- [26] Alcatel-Lucent realiza una prueba piloto de una red WIMAX Rev-e en Andalucía
<http://www.gigle.net/alcatel-lucent-realiza-una-prueba-piloto-de-una-red-wimax-rev-e-en-andalucia/>

- [27] MERA, Diego. *Análisis de la tecnología inalámbrica WIMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) y sus aplicaciones de banda ancha en telecomunicaciones*. Ecuador 2005.
- [28] WiMAX
<http://recursostic.educacion.es/observatorio/web/ca/equipamiento-tecnologico/redes/349-andres-lamelas-torrijos>

CAPÍTULO 2

TECNOLOGÍA 4G LTE

2.1 INTRODUCCIÓN

LTE nace con el objetivo de superar a sistemas previos en velocidad de transmisión, capacidad, eficiencia y movilidad, para lo cual se ha desplegado un conjunto de técnicas tanto a nivel de *hardware* como de *software* para que de esta forma *LTE* sea considerada una tecnología superior a cualquier otra y próxima a *4G*. Es por ello que este capítulo se centrará en comprender el funcionamiento de la tecnología y de esta manera saber cómo es que *LTE* brinda altas tasas de transmisión con y sin movilidad, permitiendo tener servicios multimedia de alta y buena calidad a velocidades de descarga de datos impresionantes. En fin son muchas las mejoras, las aplicaciones y las utilidades que puede brindar esta tecnología que a continuación se resume de forma breve el contenido del presente capítulo.

La primera parte presenta una descripción de la arquitectura general de los sistemas *3GPP*, después el capítulo se centra en tres puntos fuertes que permitirán sentar las bases de *LTE*.

El primer apartado contiene un análisis de la arquitectura del sistema, este análisis se ha dividido en cuatro esquemas importantes: la arquitectura de *E-UTRAN*, la arquitectura de la *EPC*, el subsistema *IMS* y el equipo de usuario.

El segundo apartado presenta un estudio de la interfaz radio de *LTE* para lo cual su estudio se ha dividido en dos partes, la primera se basa en el estudio de la pila de protocolos, canales lógicos y canales de transporte; la segunda parte realiza un estudio de la capa física en donde se especifican puntos como estructuración de tramas, canales físicos tanto en el enlace descendente como ascendente y de manera análoga el estudio de señales de referencia y sincronización.

Finalmente el tercer apartado comprende un estudio completo de las tecnologías de transmisión de nivel físico que utiliza *LTE* para la transmisión y recepción de datos tanto de usuario como de control. Estas tecnologías se analizan por separado y son: *OFDM*, *OFDMA*, *SC-FDMA* y *MIMO*.

2.2 ARQUITECTURA GENERAL DE LOS SISTEMAS 3GPP ^[3]

La arquitectura general de los sistemas *3GPP* está formada de tres componentes fundamentales que hacen posible que exista la red, éstos son: el equipo de usuario, la red de acceso y la red troncal. Para poder comunicar el equipo de usuario con la red de acceso es necesario el uso de una interfaz radio y para poder interconectar la red de acceso con la red de *core* o red troncal se requieren interfaces *AN-CN* (*Access Network – Core Network* Red de Acceso – Red de Core), tal y como lo muestra la Figura 2.1.

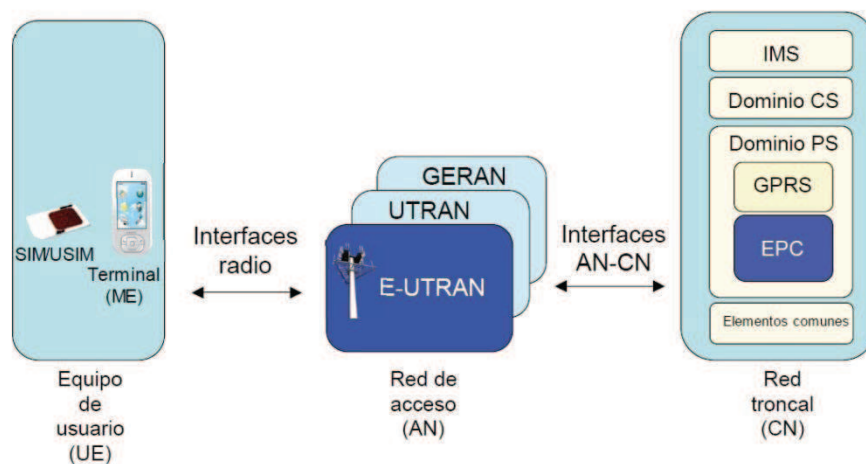


Figura 2.1. Arquitectura de los sistemas *3GPP* ^[3]

En la Figura 2.1 el bloque correspondiente al equipo de usuario *UE* (*Unit Equipment*) está constituido por un terminal móvil *ME* (*Mobile Equipment*) y por una *SIM* (*Subscriber Identity Module*).

La red de acceso está constituida por tres redes, éstas son: *GERAN* (*GSM/EDGE*

Radio Access Network), *UTRAN* (*UMTS*¹⁰ *Terrestrial Radio Acces Network*) y *E-UTRAN*¹¹ (*Evolved UTRAN*). Cada red de acceso define su propia interfaz de radio para la comunicación con los equipos de usuario, es así que *GERAN* utiliza *TDMA*¹², *UTRAN* usa *WCDMA*¹³ y *E-UTRAN* se basa en la tecnología *OFDMA*.

La red de *core* tiene los siguientes componentes: un dominio de circuitos *CS*¹⁴, un dominio de paquetes *PS*¹⁵, el subsistema *IMS*¹⁶ y elementos comunes.

El dominio *CS* contiene todo el equipo y entidades necesarias para proveer servicios de telecomunicaciones basados en conmutación de circuitos, por ejemplo servicios de voz y videoconferencia en redes *UMTS*. Hay que tener claro que este dominio es alcanzable únicamente por las redes de acceso *GERAN* y *UTRAN*.

El dominio *PS* es una parte de la red de *core* que brinda servicios de telecomunicaciones basados en conmutación de paquetes. Este dominio tiene dos bloques, el primero se llama *GPRS* y el segundo *EPC* (*Evolved Packet Core*)¹⁷. *GPRS* está basada en el dominio *PS* usada por las redes de acceso *GERAN* y *UTRAN*, en tanto que la red de acceso *E-UTRAN* utiliza *EPC*. *EPC* es la evolución de *GPRS* y está basado completamente en conmutación de paquetes. *EPC* es una de las partes fundamentales que definen al sistema *LTE*. Proporciona conectividad *IP* a los equipos de usuario a través de la red de acceso

¹⁰ *UMTS* (*Universal Mobile Telecommunications System* - Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles) es una tecnología 3G sucesora de *GSM* que puede soportar velocidades de transmisión de datos de hasta 2 Mbps.

¹¹ *E-UTRAN* es la nueva red de acceso de *LTE*. Muchas veces se usa el término *LTE* como sinónimo de *E-UTRAN*.

¹² *TDMA* (*Time Division Multiple Access* - Acceso Múltiple por División de Tiempo): Tipo de multiplexación en el que el ancho de banda total del medio de transmisión es asignado a cada canal durante una fracción de tiempo.

¹³ *WCDMA* (*Wideband Code Division Multiple Acces* - Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha): es una tecnología móvil inalámbrica de tercera generación que aumenta las tasas de transmisión de datos de los sistemas *GSM* utilizando la interfaz aérea *CDMA* y por ello ofrece una alta velocidad de transmisión de datos: 398 Kbps con área de cobertura amplia, 2 Mbps de cobertura local.

¹⁴ *CS* (*Circuit Switched* - Circuitos Conmutados): Asignación de recursos de forma dedicada en el momento de establecimiento de una conexión, hasta la finalización del servicio.

¹⁵ *PS* (*Packet Switched* - Paquetes Conmutados): Consisten en interconexiones facilitadas por los servicios de telecomunicaciones, a través de la cual los paquetes viajan desde la fuente hasta el destino.

¹⁶ *IMS* (*IP Multimedia Subsystem*): Subsistema Multimedia basado en *IP*.

¹⁷ *EPC* es sinónimo de *Evolved 3GPP Packet Switched Domain* y *SAE* (*System Architecture Evolution*).

E-UTRAN, también puede ser usado por *GERAN*, *UTRAN* y por redes que no son *3GPP*.

En la red de *core* también se puede apreciar un bloque denominado “Elementos comunes”, este bloque está formado por elementos tanto de software como de hardware que permiten interactuar y operar a los distintos bloques: *CS*, *PS* e *IMS*, también contienen bases de datos con información de los usuarios registrados en la red.

Finalmente el subsistema *IMS* es el encargado de proveer servicios multimedia basados en *IP*, también es el responsable de la señalización a nivel de aplicación de estos servicios y utiliza como mecanismo de transporte los servicios de conectividad proporcionados por el dominio *PS*.

2.3 ARQUITECTURA DEL SISTEMA LTE ^[3]

A diferencia de la arquitectura de red genérica de los sistemas *3GPP*, *LTE* presenta tres elementos que lo identifican plenamente: *E-UTRAN* (red de acceso), *EPC* (red de *core*) y la evolución de *IMS*. Tanto la red de acceso como la red de *core* de *LTE* brindan servicios encaminados a la transferencia de información basada en paquetes *IP* entre el equipo de usuario y redes de paquetes externas tales como plataformas *IMS* y fundamentalmente *Internet*.

A continuación se muestra la Figura 2.2 que engloba en su totalidad al sistema *LTE*, como se puede ver, la gráfica también incluye elementos que no son propios de *EPS* debido a que, tal y como se ha mencionado anteriormente, la arquitectura de *LTE* permite también la interconexión de otras redes, tanto *3GPP* como *no 3GPP*, pero el objetivo de este análisis se centra fundamentalmente en la arquitectura de *LTE*.

La interfaz entre *E-UTRAN* y *EPC* se denomina *S1*. La interfaz entre los equipos de usuario y *E-UTRAN* es la interfaz de radio *Uu*. La conexión a redes externas y plataformas de servicios se logra a través de la interfaz *SGi* de la *EPC*.

Los mecanismos de control se realizan con otros elementos ofrecidos por *EPC*, por ejemplo *HSS* (*Home Subscriber Server*) es la base de datos del sistema con información de la suscripción de sus usuarios. La interconexión de las redes de acceso *3GPP* y aquellas que no los son, se lleva a cabo mediante un conjunto de interfaces de la *EPC* tal como lo indica la Figura 2.2.

La interconexión de los diferentes equipos que intervienen tanto en la red de acceso como de *core* en una red *LTE* se realiza mediante tecnologías basadas en *IP*, es decir, la infraestructura de una red *LTE*, incluye equipos que implementan las funciones del estándar *3GPP* y elementos propios de redes *IP* como *routers* y servidores: *DHCP*, *DNS*, etc.

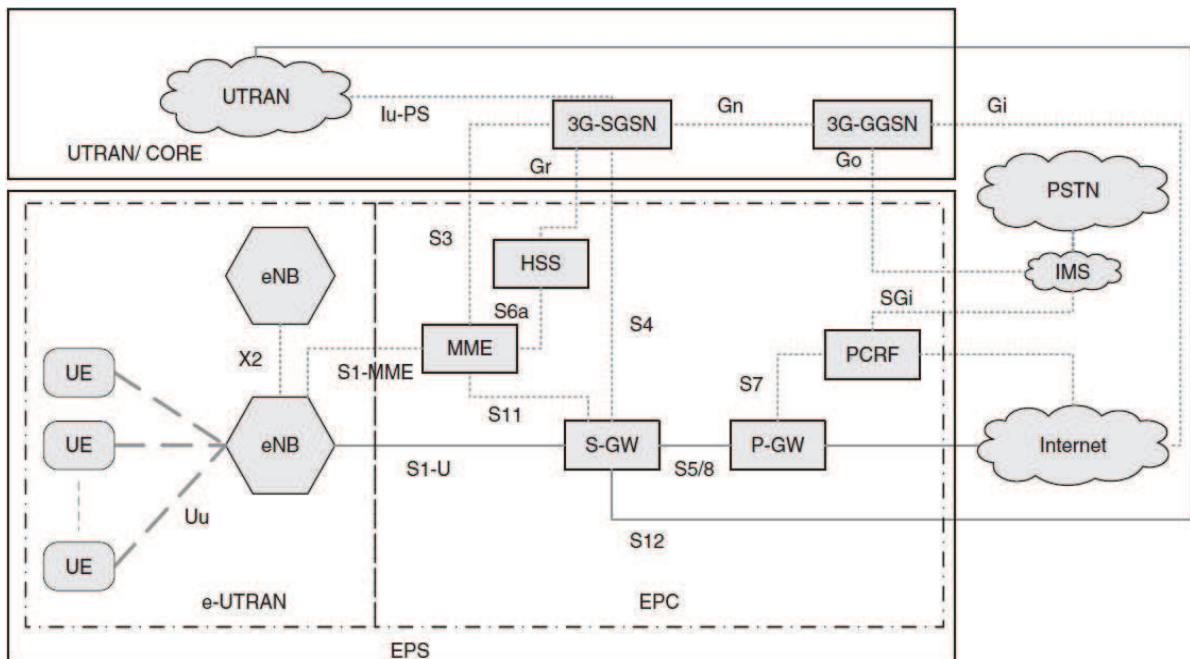


Figura 2.2 Arquitectura detallada de *LTE* ^[1]

2.3.1 ARQUITECTURA DE *E-UTRAN*

La red de acceso *E-UTRAN* está formada fundamentalmente por *eNBs* (*evolved Node B*) que son los encargados de brindar la conectividad entre el equipo de usuario *UE* y la *EPC*. Un *eNB* se conecta con los demás elementos del sistema

mediante tres interfaces: *E-UTRAN Uu*, *S1* y *X2*. La interfaz *E-UTRAN Uu* es conocida como interfaz de radio *LTE* y es la que permite la transferencia de información por el canal radio entre el *eNB* y los equipos de usuario. El control del funcionamiento de esta interfaz la realiza el *eNB*.

El *eNB* se conecta al *EPC* mediante la interfaz *S1* la cual se divide en dos interfaces: *S1-MME* y *S1-U*. Mediante la interfaz *S1-MME*, el *eNB* se comunica con una entidad de red *EPC* denominada *Mobility Management Entity* que se encarga únicamente de las funciones relacionadas con el plano de control. Por otro lado, mediante la interfaz *S1-U*, el *eNB* se comunica con otra entidad de red conocida como *S-GW (Serving Gateway)* encargada de trabajar con el plano de usuario. El plano de usuario de una interfaz se refiere a la torre de protocolos empleados para el envío de tráfico de usuario a través de dicha interfaz; y, el plano de control se refiere a la torre de protocolos encargados de gestionar la operación de la interfaz o la entidad, es decir, se puede configurar el *eNB* desde la red *EPC* a través de *S1-MME*.

Finalmente los *eNBs* pueden conectarse entre sí mediante la interfaz *X2*. Gracias a esta interfaz, los *eNBs* pueden enviar información de señalización para poder reducir las interferencias que se produzcan y mejorar el manejo de los recursos de radio, también por esta interfaz se puede transportar tráfico de los usuarios cuando se produce un proceso de *handover*.

La Figura 2.3 muestra los elementos que forman parte de *E-UTRAN*.

2.3.1.1 Entidades de red e interfaces

2.3.1.1.1 Evolved Node B (eNB)

El *eNB* es el equivalente a una estación base e integra todas las funciones de la red de acceso *E-UTRAN*. En el *eNB* finalizan todos los protocolos de la interfaz radio. Los protocolos entre la *UE* y el *eNB* se llaman protocolos de capa de acceso *AS (Access Stratum)*. Por medio de estos protocolos el *eNB* puede realizar

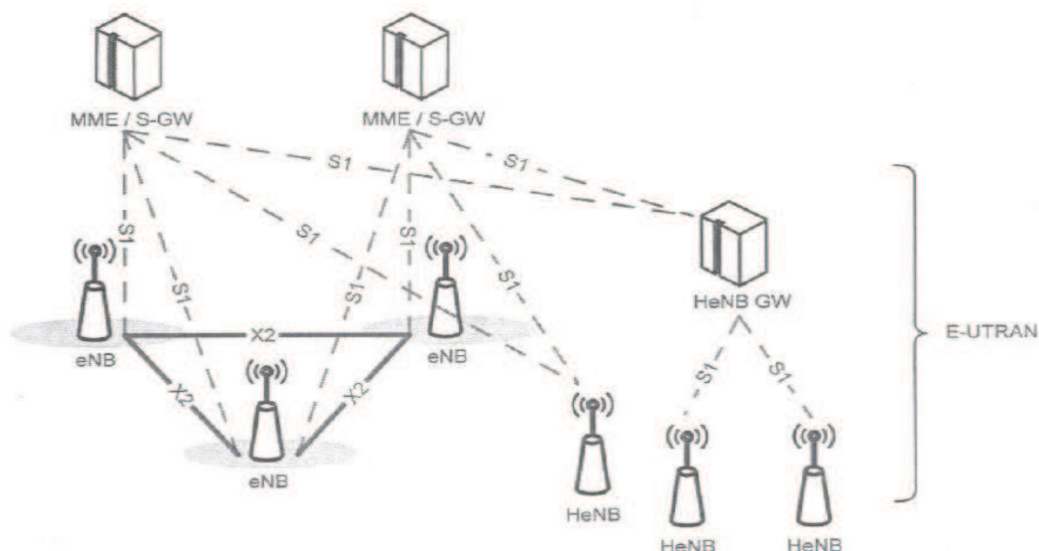


Figura 2.3. Elementos que forman parte de *E-UTRAN* ^[2]

la transmisión de paquetes *IP* hacia los equipos de usuario y viceversa, es decir desde el equipo de usuario hasta el *eNB*, en ambos casos se envían también mensajes de señalización necesarios para controlar la operación de la interfaz radio. El servicio de transferencia de paquetes *IP* entre un *eNB* y un equipo de usuario se denomina servicio portador de radio (*Radio Bearer, RB*).

El papel que desempeña el *eNB* sin duda alguna es clave para la gestión de los recursos radio, es decir el *eNB* realiza funciones de control de: admisión de los servicios portadores radio, control de movilidad, asignación dinámica de los recursos radio tanto en *uplink* como *downlink*, es decir funciones de *scheduling*; control de interferencias entre estaciones base, control de los mensajes que envían los equipos de usuario para mejorar la gestión de los recursos, etc. Las funciones asociadas a la gestión de recursos radio son necesarias para la operación eficiente de *E-UTRAN*.

El *eNB* puede interactuar con múltiples *MMEs* y *SG-Ws* de la red de *core EPC*, con lo cual, otra de las funciones del *eNB* es encaminar tráfico de los usuarios hacia las entidades de red correspondientes.

En resumen, las principales funcionalidades del *eNB* son:

- Funciones de gestión de los recursos de radio como control de portadores, control de admisión, *scheduling*, asignación dinámica de recursos y control de movilidad.
- Encriptación de los datos.
- Compresión de la cabecera de los paquetes *IP* para reducir la sobrecarga y poder trabajar con paquetes pequeños.
- Conectividad con elementos *EPC*.

2.3.1.1.2 Interfaz Radio Uu

Soporta tres tipos de mecanismos de transferencia de la información en el canal radio, éstos son:

- *Difusión de señalización de control en la zona de cobertura de la celda.* La información difundida corresponde a información *AS* específica de la red de acceso e información *NAS (Non Access Stratum)* de la red de *core*. La información enviada permite a los *UEs* detectar la presencia del *eNB* y conocer sus parámetros básicos de operación. La difusión de señalización de control también permite que el *UE* establezca una operación de *paging*.
- *Trasferencia de paquetes IP de los usuarios a través del canal radio.* La transferencia de paquetes *IP* entre un *eNB* y un equipo de usuario se denomina servicios portadores radio (*Radio Bearers. RB*). Los servicios portadores de *E-UTRAN* han sido diseñados únicamente para soportar tráfico *IP* y no permiten la transferencia de paquetes *X.25*, tramas *Ethernet*, etc. Los servicios portadores realizan compresión de las cabeceras de los paquetes *IP*, esto permite reducir el número de bytes enviados por la interfaz radio, lo cual conlleva a una optimización de los recursos asignados.
- *Transferencia de señalización de control dedicada entre el eNB y un UE.* La conexión de control se soporta mediante el protocolo *RRC (Radio Resource Control)*. Gracias a este protocolo es posible realizar operaciones

de establecimiento, modificación y liberación de los servicios portadores radio entre el *eNB* y el *UE*. Otros mecanismos claves para la gestión eficiente de los recursos radio son: el control y envío de información desde los terminales hacia el *eNB* y el mecanismo de *handover*.

La información enviada por la interfaz radio es protegida mediante funciones de cifrado que proporcionen confidencialidad e integridad. Las funciones de cifrado se aplican tanto al tráfico de usuario como a los mensajes de señalización *RRC*.

2.3.1.1.3 Interfaz *S1* (*eNB* - *EPC*)

La interfaz entre el *eNB* y el *EPC* se subdivide en dos interfaces: una usada para el plano de usuario y otra para el plano de control. El plano de usuario de *S1* se denomina *S1-U* (*S1 User Plane*) y el plano de control se denomina *S1-MME* o también *S1-C*.

La interfaz *S1-U* proporciona un servicio de transferencia de datos entre el *eNB* y la entidad *S-GW* sin garantía de entrega de la información, tampoco soporta mecanismos de control de errores ni de control de flujo.

La interfaz *S1-MME* soporta un conjunto de funciones y procedimientos de control entre *eNBs* y la entidad *MME*.

La interfaz *S1* permite que un *eNB* pueda estar conectado simultáneamente a múltiples equipos de la red troncal, es decir, múltiples *MMEs* y/o múltiples *S-GWs*, esta característica se denomina *S1-flex* y permite que la red sea más robusta a fallos de nodos de la red troncal, lo que se traduce en que el sistema nunca deja de operar ya que los *eNBs* afectados pueden seguir ofreciendo servicio a través de otros nodos, esto es consecuencia de que un *eNB* no está ligado a un único nodo en la red de core. También permite el acceso a nodos de redes troncales de diferentes operadores que comparten la red de acceso. Otra ventaja de *S1-flex* es que la frecuencia con la que se cambia un terminal con otro nodo *MME* se reduce gracias a que un conjunto mayor de *eNBs* se conecta al mismo *MME*. Finalmente otra de las grandes ventajas que presenta la característica *S1-flex* es el

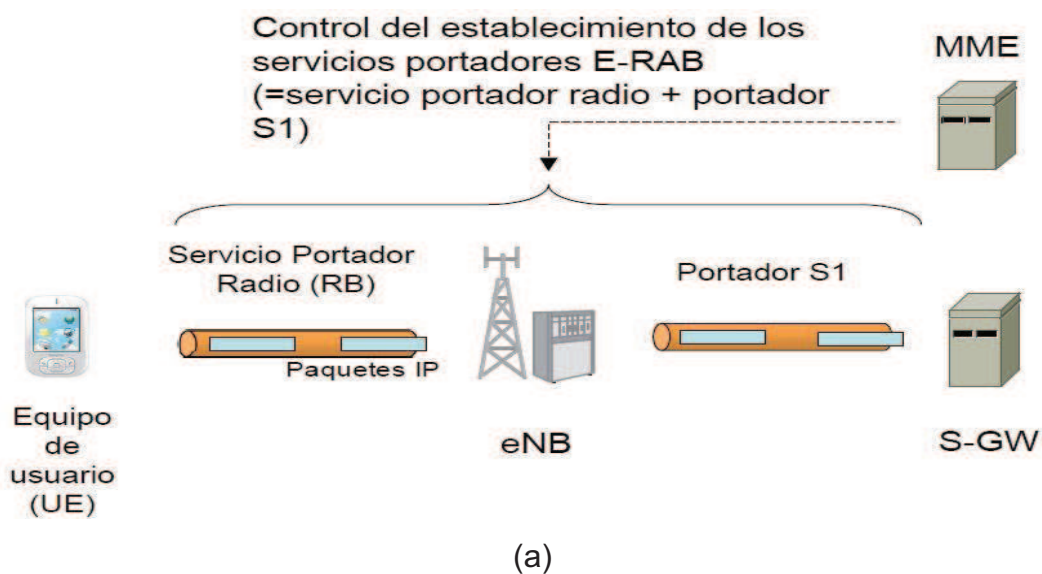
despliegue de estrategias de balanceo de carga entre la red de acceso *E-UTRAN* y los nodos de la red troncal *EPC*.

Dentro de los procedimientos soportados por la interfaz *S1* se pueden mencionar:

- Procedimientos para establecimiento, modificación y liberación de recursos de los servicios portadores tanto en la interfaz radio (servicio portador radio o *RB*) como en la interfaz *S1* (*S1 bearer*).

En *LTE* el establecimiento de los servicios portadores que constituyen el plano de usuario para la transferencia de tráfico *IP* se controla desde la entidad *MME*, es decir, mediante la interfaz *S1-MME* se tiene el control de los servicios portadores radio y *S1*. El servicio portador completo, es decir, la unificación de un servicio portador radio y un servicio portador *S1*, que ofrece la red de acceso *E-UTRAN*, se denomina *E-RAB* (*E-UTRAN Radio Access Bearer*).

En la Figura 2.4, (a) muestra la formación del servicio portador *E-RAB* y (b) representa la arquitectura completa de los servicios portadores a través de las distintas interfaces. Se puede ver claramente que *E-RAB* es solo una parte del conjunto total de servicios portadores.



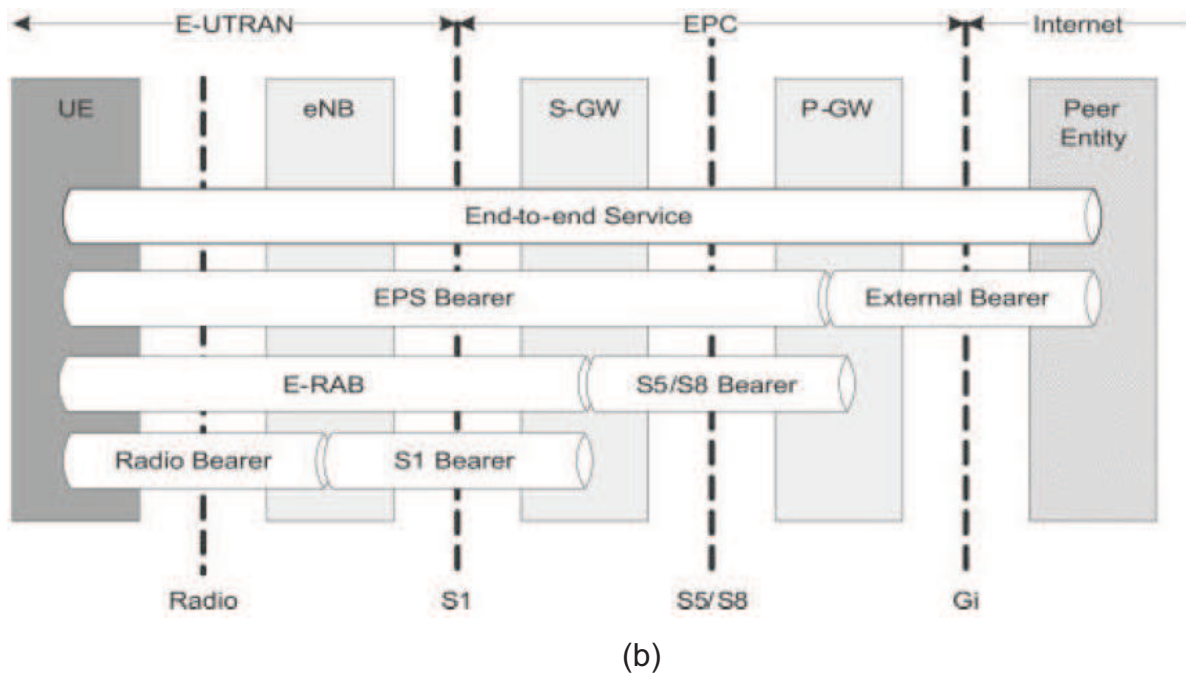


Figura 2.4. (a) Servicios portadores E-RAB. ^[3] (b) Servicios Portadores de LTE en las diferentes interfaces de EPS. ^[2]

- Procedimientos de *handover* entre *eNBs*. La interfaz adecuada es *S1-MME* y es muy útil cuando la red de acceso decide que un terminal debe cambiar de *eNB* manteniendo la conexión y no existe una interfaz *X2* entre los *eNBs* involucrados, cuando esto sucede, entonces la interfaz *S1-MME* es la que se encarga de ejecutar el procedimiento de *handover* y por lo tanto no se pierde la conexión. En el proceso de *handover* la entidad *MME* asociada en un principio puede establecer un nuevo contexto con el nuevo *eNB* destino y la información que se traspa es relativa a la configuración de los servicios portadores que tiene establecido el usuario así como las claves de seguridad.
- Procedimientos de aviso (*Paging*). Mantener una gestión de localización de los equipos de usuario en la red es muy importante y es una de las funciones básicas que ejecuta la *MME*, gracias a esta gestión se puede saber en qué *eNB* o *eNBs* puede ser localizado un usuario que se encuentre en modo *idle*, es decir que no tenga establecida una conexión de control *RRC* con ningún *eNB*. Cuando la *MME* quiere que un terminal

pase de modo *idle* a modo activo, a través de la interfaz *S1-MME* ordena la ejecución de aviso en todos los posibles *eNBs* donde es probable que se encuentre el terminal.

- Envío transparente de mensajes de señalización de control entre la entidad *MME* y el *eNB* que fluyen entre el *MME* y el equipo de usuario. Estos mensajes corresponden a protocolos denominados *NAS (Non Access Stratum)* que se explicarán más adelante.

2.3.1.1.4 Interfaz *X2 (eNB - eNB)*

La interfaz *X2* también tiene un plano de usuario y un plano de control. En el plano de usuario de la interfaz *X2* se puede realizar transferencia de datos de usuario entre *eNBs* sin garantías de entrega de la información y sin el uso de mecanismos de control de errores y de flujo. La transferencia de datos de usuario entre *eNBs* se realiza solo en los procesos de *handover*, intercambiando los paquetes de información de usuario almacenada en el *eNB* anterior hacia el *eNB* nuevo. Respecto al plano de control se puede mencionar que esta interfaz realiza el control de transferencia de paquetes *IP* al plano de usuario de *X2*. Por último a través de la interfaz *X2* del plano de control, *eNBs* que tengan celdas vecinas pueden transferirse información para llevar a cabo funciones de gestión de recursos radio como la coordinación de interferencias entre celdas que operen en el mismo canal.

2.3.1.2 Protocolos

Las torres de protocolos usadas en las tres interfaces de *E-UTRAN: radio, S1 y X2*, están estructuradas en base a un plano de usuario y a un plano de control.

- En el plano de usuario se encuentran los protocolos utilizados para el envío de paquetes *IP* a través de la red. Los paquetes *IP que se envían* son servicios a los que acceden los terminales.

- En el plano de control se encuentran los protocolos necesarios para sustentar funciones y procedimientos de gestión en las diferentes interfaces.

2.3.1.2.1 Protocolos en la interfaz radio

En la Figura 2.5 se muestra la torre de protocolos soportada por la interfaz radio. El envío de paquetes *IP* se sustenta específicamente en dos capas: la capa de enlace y la capa física. La capa de enlace a su vez está formada por las subcapas: *Packet Data Convergence Protocol (PDCP)*, *Radio Link Control (RLC)* y *Medium Access Control (MAC)*. Tanto el plano de usuario como el plano de control soportan en su capa de enlace los protocolos *PDCP*, *RLC*, *MAC* y también tienen en común la capa física. La diferencia está en que el plano de control presenta protocolos a nivel de red específicos y estos son el *Radio Resource Control (RRC)* y los protocolos *NAS*. La descripción de estos protocolos se realizará más adelante, por ahora es conveniente solo mencionarlos¹⁸.

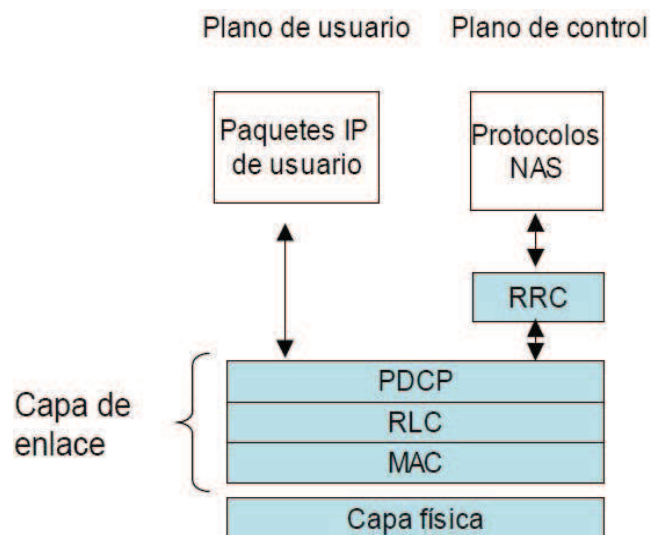


Figura 2.5. Torre de protocolos en la interfaz radio ^[3]

¹⁸ Véase la sección: 2.4.1 Descripción de la pila de protocolos, canales lógicos y canales de transporte de la interfaz radio.

2.3.1.2.2 Protocolos en las interfaces S1 y X2

La estructura de protocolos utilizada en las interfaces S1 y X2 se separa en dos capas: la capa de red radio (*Radio Network Layer, RNL*) y la capa de red de transporte (*Transport Network Layer, TNL*), tal como lo muestra la Figura 2.6.

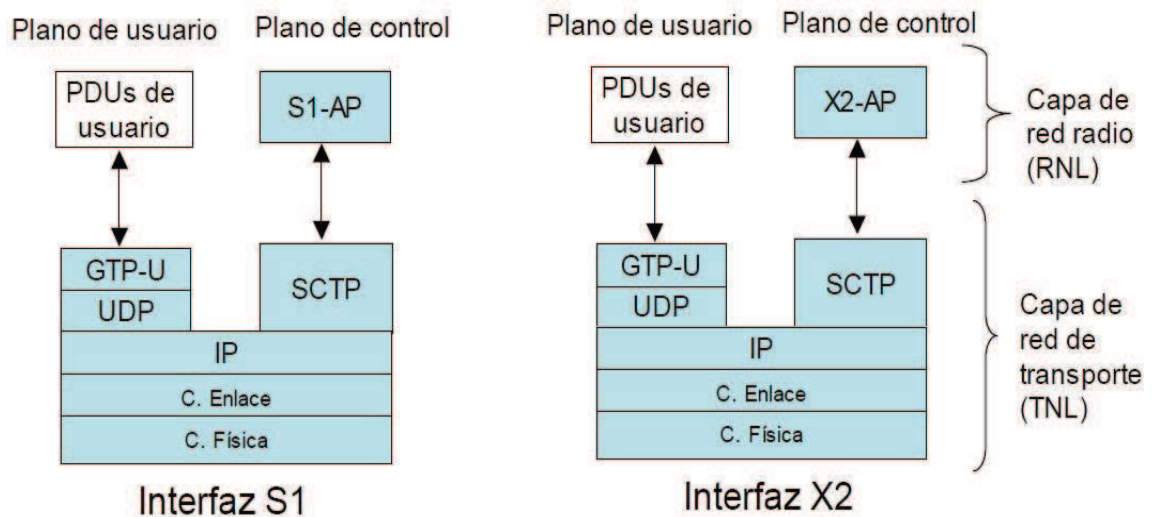


Figura 2.6. Torre de protocolos en las interfaces S1 y X2 ^[3]

Esta división de capas tiene como objetivo aislar las funciones que son específicas del sistema de comunicaciones móviles *LTE*, de aquellas otras que dependen de la tecnología de transporte utilizada.

Los protocolos específicos de la red de acceso radio constituyen la capa *RNL*, mientras que la capa *TNL* alberga los protocolos utilizados para el transporte de la información de la capa *RNL* entre las entidades de la red.

El plano de usuario de la interfaz S1 (*S1-U*) y de la interfaz X2 utilizan el protocolo de encapsulado *GTP-U* (*GPRS Tunneling Protocol – User Plane*) para el envío de paquetes *IP* de usuario. El protocolo *GTP-U* es un protocolo heredado de *GPRS*, se utiliza fundamentalmente para multiplexar los paquetes *IP* de múltiples usuarios, los paquetes *IP* de un determinado servicio portador se encapsulan con una determinada etiqueta conocida también como identificador de túnel. En las

interfaces *S1-U* y *X2*, el protocolo *GTP-U* se transporta sobre *UDP/IP*.

Finalmente, es importante destacar que los planos de usuario de ambas interfaces no contemplan mecanismos de entrega garantizada para la transferencia de los paquetes de usuario, ni tampoco mecanismos de control de errores o control de flujo.

Respecto al plano de control de la interfaz *S1* (*S1-MME* o *S1-C*), la capa de red radio consiste en el protocolo *S1-AP* (*S1 - Application Part*); y, respecto al plano de control de la interfaz *X2*, el protocolo utilizado se denomina *X2-AP* (*X2 Application Part*).

El protocolo *S1-AP* es el que se encarga del establecimiento de servicios portadores en el *eNB*, control del *handover*, *paging*, etc.; es decir de funciones asociadas a la interfaz *S1* que ya se explicaron anteriormente cuando se habló de dicha interfaz, de igual manera el protocolo *X2-AP* se encarga de funciones asociadas a la interfaz *X2* que ya se explicaron con anterioridad. La transferencia de los mensajes de señalización del protocolo *S1-AP* entre *eNBs* y *MMEs* se realiza mediante el servicio de transferencia fiable que ofrece el protocolo de transporte *Stream Control Transmission Protocol* (*SCTP*).

SCTP es un protocolo de transporte como *TCP* y *UDP* de propósito general, estandarizado por *IETF* (*Internet Engineering Task Force*) en la *RFC4960*, que fue concebido originariamente para el envío de señalización de redes telefónicas sobre redes *IP*.

SCTP hereda muchas de las funciones contempladas en *TCP* a la vez que introduce importantes mejoras encaminadas a proporcionar mayor robustez y versatilidad en la transferencia de diferentes tipos de información.

Al igual que *TCP*, *SCTP* dispone de mecanismos de control de flujo y de congestión en la conexión lo que se denomina asociación. *SCTP* incorpora soporte para *multihoming* (soporte de transferencia a través de múltiples caminos entre los nodos participantes, es decir, los nodos participantes pueden disponer

de múltiples direcciones IP), *multi-streaming* (múltiples flujos pueden enviarse en paralelo en una misma asociación) y el envío de la información se estructura en base a mensajes (a diferencia del protocolo TCP que trata la información como una secuencia de bytes). Estas nuevas capacidades y funcionalidades de *SCTP* son las que hicieron que en *3GPP* se optara por la utilización de este protocolo, en lugar de TCP, para implementar el plano de control de las interfaces *S1* y *X2* de *E-UTRAN*.

Gracias a la descripción realizada anteriormente, a continuación se muestra en la Figura 2.7 el plano de usuario completo de *E-UTRAN* para el envío de paquetes *IP* entre el equipo de usuario (*UE*) y la red troncal (*S-GW*), de igual manera se muestra en la Figura 2.8 la torre de protocolos del plano de control para el envío de señalización *NAS* entre el equipo de usuario y la red troncal (*MME*).

En el plano de usuario, los paquetes *IP* contienen información correspondiente al servicio que el usuario está utilizando, es decir, voz, video, datos, así como la señalización a nivel de aplicación. El *eNB* realiza funciones de "relay" entre la torre de protocolos *PDCP*, *RLC*, *MAC* y *PHY* de la interfaz radio y la torre de protocolos de la interfaz *S1-U*.

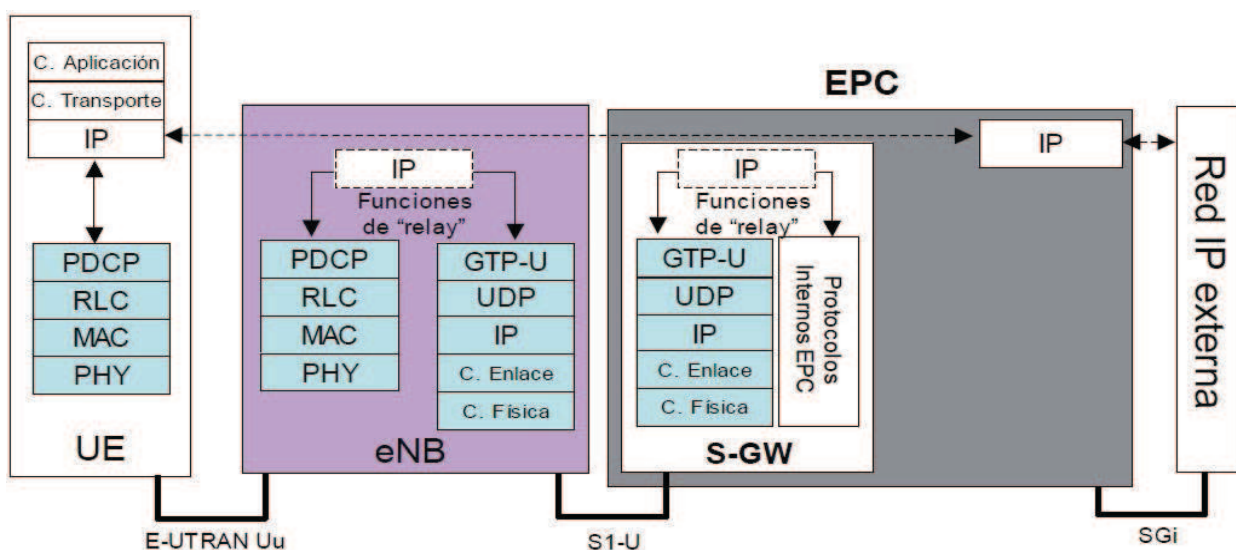


Figura 2.7. Protocolos del plano de usuario de *E-UTRAN* ^[3]

En el plano de control los protocolos *NAS* se transportan encapsulados de forma transparente dentro de mensajes *RRC* en la interfaz radio y en mensajes *S1-AP* en la interfaz *S1-MME*. El *eNB* realiza las funciones de “*relay*” necesarias entre ambas torres de protocolos.

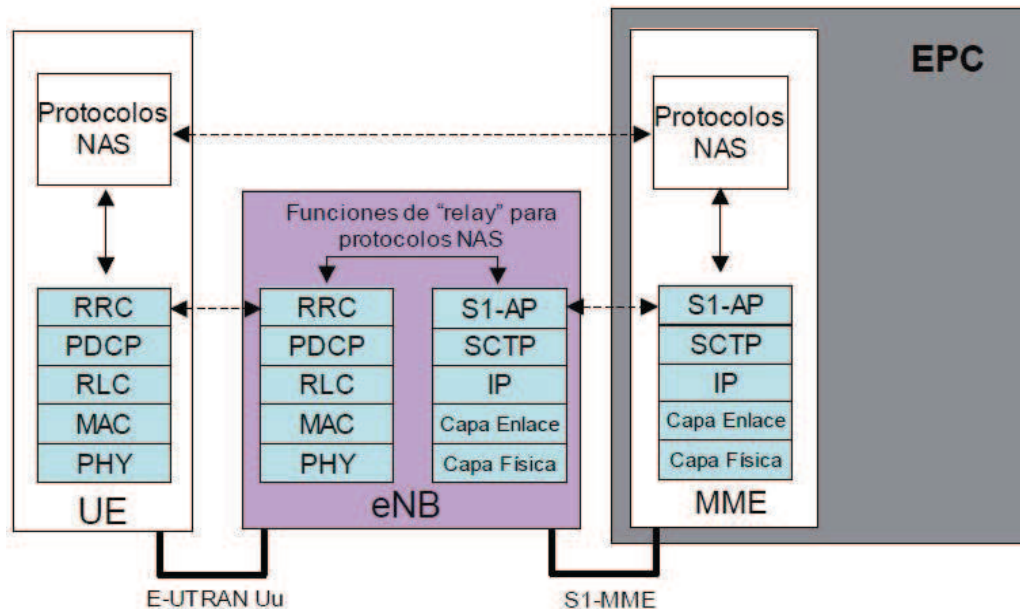


Figura 2.8. Protocolos del plano de control de *E-UTRAN* ^[3]

2.3.2 ARQUITECTURA DE EPC (*EVOLVED PACKET CORE* - RED TRONCAL DE PAQUETES EVOLUCIONADA)

La arquitectura de *EPC* brinda un servicio de conectividad *IP* basado en la posibilidad de acceder a sus servicios a través de otras redes de acceso tanto *3GPP* (*UTRAN* y *GERAN*) como no *3GPP* (*CDMA2000*, *WiMAX*, *802.11*).

La Figura 2.9 muestra la red troncal *EPC* para la provisión de servicios de conectividad *IP* a través de una red de acceso *E-UTRAN*. Las entidades de red de la arquitectura *EPC* son entidades funcionales, es decir son entidades lógicas que cubren una funcionalidad perfectamente delimitada. Una implementación concreta de la red *EPC* permite que diferentes entidades funcionales puedan estar en el mismo equipo físico.

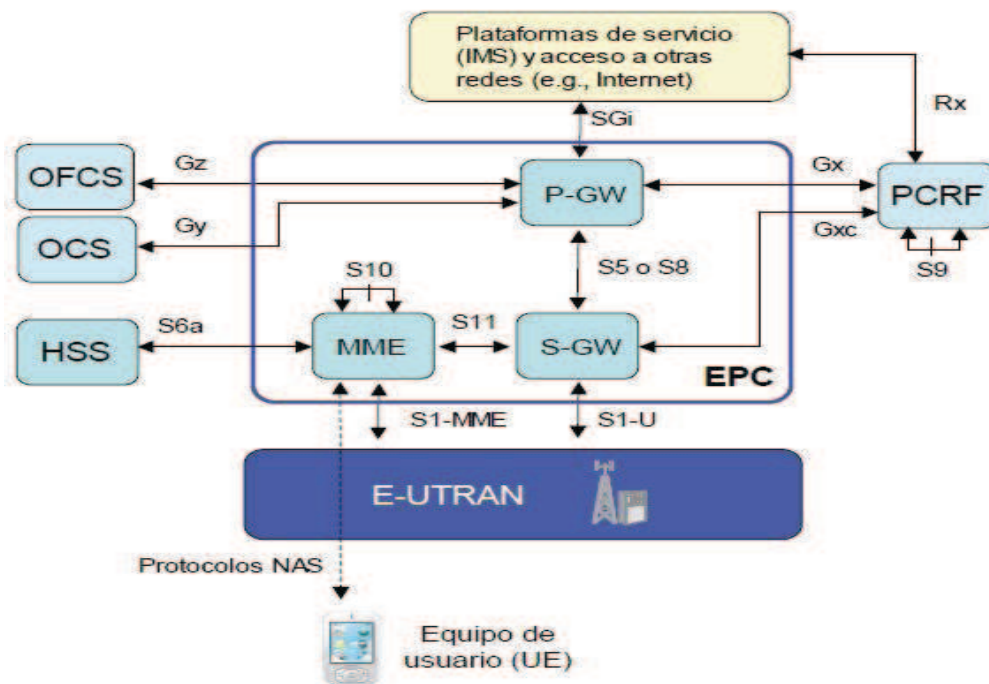


Figura 2.9. Arquitectura de EPC [3]

El núcleo del sistema EPC está formado por tres entidades de red: MME (*Mobility Management Entity*), S-GW (*Serving Gateway*) y P-GW (*Packet Data Network Gateway*). Estas tres entidades, junto con la base de datos principal conocida como HSS (*Home Subscriber Server*), constituyen los elementos básicos para la provisión del servicio de conectividad IP entre los equipos de usuario conectados a través de E-UTRAN y redes externas a las que se conecta la red troncal EPC tal y como lo muestra la Figura 2.10.

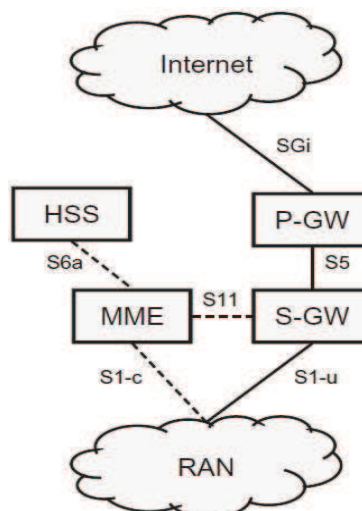


Figura 2.10. Elementos básicos de EPC [6]

Las funciones asociadas al plano de usuario tienen que ver con dos entidades: *S-GW* y *P-GW*, mientras que la entidad *MME* se encarga de las funciones y señalización del plano de control.

La interconexión de la red de acceso *E-UTRAN* con la red troncal *EPC* se realiza a través de la interfaz *S1*. La interfaz *S1-MME* que corresponde al plano de control termina en la entidad *MME*, mientras que la interfaz *S1-U* del plano de usuario termina en el *S-GW*.

La entidad *MME* controla las funciones de transferencia del plano de usuario con la entidad *S-GW* a través de la interfaz *S11*, se conecta a la entidad *HSS* a través de la interfaz *S6a* para acceder a la información asociada a los usuarios de la red que estén autorizados a establecer conexiones a través de *E-UTRAN*. Las entidades *MME* también pueden comunicarse entre ellas mediante la interfaz *S10*.

La interconexión de la *EPC* con redes externas o plataformas de servicio *IMS* (*IP Multimedia Subsystem*) se realiza a través de la entidad *P-GW* mediante la interfaz *SGi*. La entidad *P-GW* se encarga de asignación de direcciones *IP* a los equipos de usuario y realiza el control de *QoS* de las sesiones de datos establecidas. Internamente, la entidad *P-GW* se conecta a la entidad *S-GW* mediante la interfaz *S5*, cuando ambas entidades pertenecen al mismo operador; y, mediante la interfaz *S8*, cuando éstas se encuentran en redes de operadores diferentes y se proporciona un servicio de *roaming*.

La entidad de red *PCRF* (*Policy and Charging Rules Function*) constituye un elemento clave del sistema *LTE*. La entidad *PCRF* forma parte del marco funcional *PCC* (*Policy and Charging Control*) que se utiliza para controlar los servicios portadores que ofrece la red *LTE*, por ejemplo, activar y determinar los parámetros de *QoS* asociados a cada servicio portador, así como realizar el control de los mecanismos de tarificación, medición del volumen de datos transferido, tiempo transcurrido, etc.

Mediante la interfaz *Gx*, el *PCRF* gestiona los servicios portadores *EPS* de la red

LTE mediante el envío de unas reglas *PCC* que sirven para configurar la operación de unas funciones específicas del plano de usuario de la pasarela *P-GW*, como por ejemplo, funciones que limitan la velocidad de transmisión de los servicios portadores.

La entidad *PCRF* es accesible desde las plataformas de servicios externas como *IMS* mediante la interfaz *Rx*. Dicha interfaz ofrece la funcionalidad de control necesaria para que los servidores de aplicación externos puedan proporcionar información asociada a los servicios finales a los que accede el usuario junto con las características y requerimientos de *QoS*. Por ejemplo, si un usuario establece un servicio de videoconferencia a través de *IMS*, el elemento que controla la provisión del servicio en *IMS* puede indicar a través de la interfaz *Rx* cuáles son los parámetros de *QoS* que debe proporcionar el servicio portador de la red *LTE* para transferir de forma adecuada la información de la videoconferencia. Con esta información, la entidad *PCRF* envía a la red *LTE* las reglas *PCC* pertinentes para la configuración de los servicios portadores.

Finalmente, las entidades *OFCS* (*Offline Charging System*) y *OCS* (*Online Charging System*), mostradas en la Figura 2.9, constituyen el núcleo del sistema de tarificación de la red. Se puede desplegar modelos de tarificación en base a diferentes parámetros tales como tiempo de uso, volumen de datos, eventos, etc. La entidad *OFCS* interactúa con *P-GW* a través de la interfaz *Gz*, en tanto que la entidad *OCS* a través de la interfaz *Gy*.

2.3.2.1 Entidades de red de *EPC*

A continuación se describen más detalladamente las funciones soportadas por las tres entidades de red que forman el núcleo de la red *EPC*: *MME*, *S-GW* y *P-GW*; y la entidad *HSS*.

2.3.2.1.1 Mobility Management Entity (MME)

La entidad *MME* es el elemento principal dentro del plano de control de *LTE* que se encarga de gestionar el acceso de los terminales a través de *E-UTRAN*, es decir, cualquier terminal que se encuentre registrado y sea accesible a través de *E-UTRAN*, tiene una entidad *MME* asignada hacia él. Cada *MME* sirve a un conjunto determinado de *eNBs*. Dicha entidad tiene un contexto de datos de usuario como identificadores, conexiones y servicios portadores *EPS* activos, claves de seguridad, datos de localización del usuario en la red, etc. La entidad *MME* asignada a un usuario puede ir cambiando ya que depende de la ubicación y la movilidad de dicho usuario. El *MME* se encarga de las siguientes funciones:

- Gestión de movilidad de los usuarios en modo *idle* ya que la entidad *MME* es la encargada de hacer un seguimiento de la ubicación de los usuarios. Para lograr aquello, se definen áreas de seguimiento (*Tracking areas*) y procedimientos denominados *Tracking Area Update* que permiten obtener información de la localización de todos los usuarios que se encuentran registrados en *LTE*.
- Autorización, control y autenticación de los usuarios que acceden a través de *E-UTRAN* en base a los datos de usuario obtenidos del *HSS*.
- Gestión de los servicios portadores *EPS* en base a la señalización necesaria para establecer, mantener, modificar y liberar los mismos.
- Soporte y gestión de procedimientos relacionados con funciones de control de acceso hacia la red *LTE* y hacia redes externas gracias a los protocolos de señalización *NAS* que se encaminan desde el equipo de usuario hasta la entidad de red *MME* correspondiente. A más de los procedimientos de control mencionados anteriormente, a través de estos protocolos también se soportan procedimientos de establecimiento de servicios portadores *EPS*, y la gestión de movilidad de los terminales que se encuentran en modo *idle*.

2.3.2.1.2 Serving Gateway (S-GW)

La entidad *S-GW* sirve de conexión entre el plano de usuario de *E-UTRAN* y la red troncal *EPC*. Un usuario registrado en la red *LTE* dispone de una entidad *S-GW*. La asignación de la entidad *S-GW* responde a criterios geográficos así como de balanceo de cargas. Las principales funciones del *S-GW* se destacan a continuación:

- La entidad *S-GW* sirve como punto de referencia para la movilidad del terminal móvil entre *eNBs*. Así, en un proceso de *handover*, el cambio del plano de usuario conlleva a un cambio del servicio portador *S1* entre los *eNBs* implicados y el *S-GW* correspondiente, manteniéndose de esta forma inalterado el resto del plano de usuario, es decir, el camino entre *S-GW* y *P-GW*.
- Almacenamiento temporal de paquetes *IP* en caso de que los terminales móviles se encuentren en modo *idle*. El plano de usuario entre *S-GW* y el equipo de usuario puede dejar de existir cuando no existe tráfico para transmitir, por ejemplo, un terminal puede encontrarse en estado *idle* y, por lo tanto, no puede estar conectado a un *eNB*, cuando se recibe tráfico de una red externa dirigido a un usuario en modo *idle*, este tráfico llega hasta la entidad *S-GW* a cargo de ese usuario, y ésta se encarga de retener temporalmente los paquetes *IP* e inicia a través de la entidad *MME* el restablecimiento del plano de usuario con el equipo de usuario.
- La entidad *S-GW* se encarga del encaminamiento del tráfico de usuario ya que su función es la de dirigir el tráfico *IP* proveniente de los equipos de usuario hacia la entidad *P-GW* correspondiente y el tráfico de bajada proveniente de las entidades *P-GW* hacia el *eNB* a través del cual se encuentra conectado el equipo de usuario. Cuando un usuario tiene múltiples conexiones establecidas con diferentes *P-GWs* de forma simultánea, todo el tráfico atraviesa una única *S-GW*.

2.3.2.1.3 PDN Gateway (P-GW)

Proporciona conectividad entre *LTE* y redes externas. A través de esta entidad, un usuario conectado a *LTE* es visible en la red externa. Los paquetes *IP* generados por el usuario van a la red externa a través de esta entidad y, viceversa, todo el tráfico *IP* dirigido a un terminal *LTE* de la red externa va a ser encaminado hasta el *P-GW*. Un usuario tiene asignada como mínimo una entidad *P-GW* desde su registro en la red *LTE*.

Las principales funciones de la entidad *P-GW* son las siguientes:

- Tarificación de los servicios portadores que tenga establecidos el terminal.
- Asignación de la dirección *IP* a un terminal. La dirección puede ser una dirección *IPv4* o *IPv6*. La asignación de direcciones se basa en la señalización propia de *LTE*, es decir el terminal recibe la dirección *IP* a través de protocolos *NAS*, o a través de protocolos de redes *IP* como *DHCP*.
- Procesamiento del tráfico *IP* que pasa por la entidad *P-GW* a través de un conjunto de filtros que relacionan cada paquete *IP* con el usuario y servicio portador *EPS* al que pertenece. Esto permite, aplicar reglas de tarificación, y por otro lado, inspeccionar y verificar la validez de los paquetes *IP* que cursan la red, de esta forma, se pueden descartar los paquetes *IP* que sean considerados como paquetes no válidos.

2.3.2.1.4 HSS (Home Subscriber Server)

El *HSS* es la base de datos que almacena la información de los usuarios de la red. El acceso a *HSS* desde la red *EPC* se realiza desde la entidad de red *MME* mediante la interfaz *S6a*. La información contenida en el *HSS* abarca tanto información relativa a la suscripción del usuario como información necesaria para la operación de la red.

La base de datos *HSS* es consultada, y modificada, desde las diferentes entidades de red encargadas de proporcionar los servicios de conectividad o servicios finales, éstas pueden ser la *MME* de la red troncal *EPC*, *SGSN* de la red *GPRS*, *MSC* del dominio de circuitos y también desde servidores de control del subsistema *IMS*.

El *HSS* contiene tanto información permanente que sólo puede ser cambiada mediante procesos administrativos, como por ejemplo campos creados al dar de alta a un usuario en la red o cambiar las condiciones de su contrato, así como información temporal que cambia por motivos de operación del sistema, por ejemplo, la localización del terminal dentro de la zona de servicio del sistema.

Entre la información almacenada en el *HSS* se puede destacar: identificadores universales del usuario (*International Mobile Subscriber Identity, IMSI*), identificadores de servicio (*Mobile Station ISDN, MSISDN*) ; información de seguridad y cifrado; información de localización del usuario en la red en base a un identificador de la entidad de control, *MME*, que proporciona el plano de control hacia un determinado usuario; e información necesaria para la provisión de los servicios de acuerdo con las condiciones establecidas en el contrato de suscripción.

2.3.2.2 Interfaces de *EPC*

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

La interfaz *SGi* se usa para la interconexión de la entidad *P-GW* con las redes externas *IP*. La red externa puede ser una red pública como la *Internet* o cualquier otra red privada, por ejemplo una *intranet* corporativa, la red de un *ISP* o la red interna del propio operador para la provisión de servicios *IMS*. La interfaz *SGi* soporta la interconexión tanto a redes *IPv4* como *IPv6*.

Existen dos modelos de interconexión de *LTE* con la red externa, éstos son el modelo de acceso transparente y el modelo de acceso no transparente. Ambos modelos se ilustran en la Figura 2.11 y se describen a continuación.

En el modelo de interconexión transparente, la dirección *IP* asignada al terminal es válida con la red externa gracias a la entidad *P-GW* que proporciona acceso a través de dicha dirección.

En cambio, en el modelo no transparente, *LTE* ofrece acceso a una red externa de forma que las direcciones utilizadas por los terminales pertenezcan al espacio de direcciones de la red externa. La conexión entre *LTE* y la red externa se realiza con el establecimiento de un túnel *IP* entre la entidad *P-GW* y el servidor de acceso remoto. En este modelo, la entidad *P-GW* participa en funciones de autenticación del usuario y asignación de direcciones dinámicas pertenecientes a la red externa.

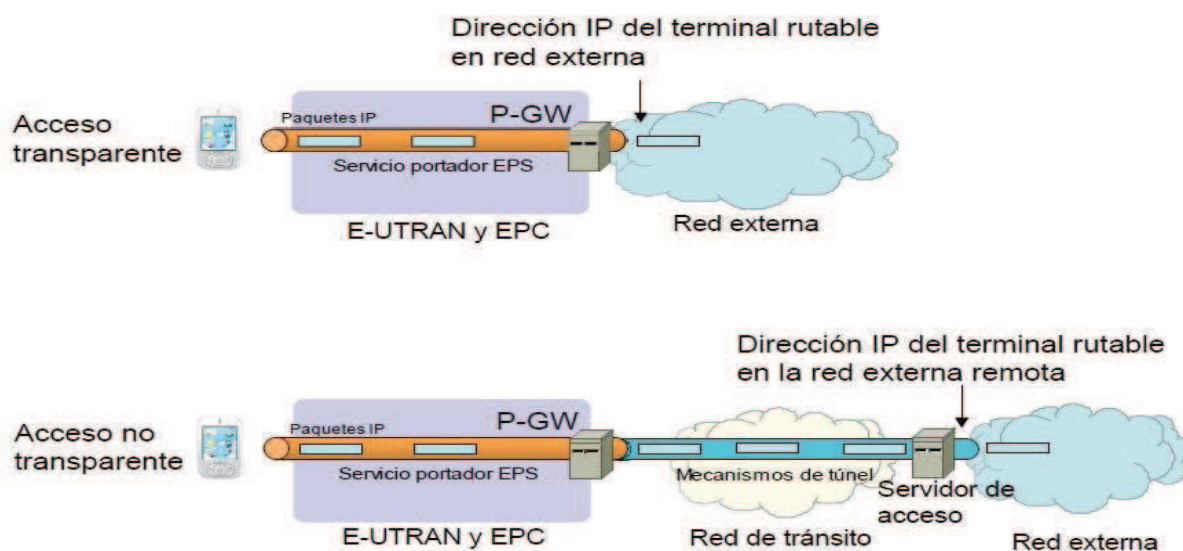


Figura 2.11. Modelos básicos de interconexión de la red *LTE* ^[3]

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

Las interfaces *S5* y *S8* permiten la transferencia de paquetes de usuario entre las entidades *S-GW* y *P-GW*. La interfaz *S5* se utiliza cuando ambas entidades pertenecen a la misma red mientras que la interfaz *S8* se utiliza en escenarios de *roaming* donde el *S-GW* pertenece a la red visitada y el *P-GW* a la red matriz. Las

interfaces S5 y S8 admiten dos implementaciones diferentes: una basada en el protocolo *GTP* y otra basada en el protocolo *PMIPv6*.

La implementación basada en *GTP* proporciona funciones de creación, eliminación, modificación y cambio del servicio portador del plano de usuario entre *S-GW* y *P-GW* de los usuarios conectados a la red *LTE*. En el caso de la implementación basada en *PMIPv6*, no se soporta ninguna gestión de servicios portadores entre *P-GW* y *S-GW* de forma que, el servicio portador *EPS* de la red *LTE* se extiende desde el equipo de usuario hasta el *S-GW* y no hasta la entidad *P-GW*, como sería el caso de utilizar *GTP* en la interfaz S5/S8. Esto es debido a que el protocolo *PMIPv6* está concebido para ofrecer exclusivamente un servicio de movilidad entre el *S-GW* y el *P-GW* y no dispone de los mecanismos necesarios para señalar parámetros de QoS. Las interfaces S5 y S8 basadas en *PMIPv6*, básicamente ofrecen un servicio de conectividad entre las entidades implicadas de forma que todos los flujos de datos son llevados a través del mismo túnel sin distinción de servicios portadores.

2.3.2.2.3 Interfaz S11 (MME - S-GW)

Esta interfaz permite controlar el plano de usuario desde la entidad de red *MME*. Los procedimientos soportados en esta interfaz permiten la creación, eliminación, modificación, cambio de los servicios portadores que los terminales tienen establecidos a través de la red troncal *LTE*.

En la interfaz *S11* se realizan procedimientos relacionados con la señalización entre el terminal y la *EPC* como son: el registro de un terminal en la red, la incorporación de un nuevo servicio portador *EPS* a una conexión, el establecimiento de una nueva conexión con otra red externa, la indicación de *handover*, etc., así como eventos originados desde la propia *EPC*, como por ejemplo, la notificación de que existe tráfico almacenado en el *S-GW* pendiente de ser enviado a un terminal en modo *idle*, la modificación de servicios portadores, etc.

La interfaz *S11* también es usada en la reubicación de la entidad *S-GW* asociada a un terminal mediante la transferencia de información entre la entidad antigua y la nueva, en este proceso se almacena toda la información relacionada con la configuración del plano de usuario. En un procedimiento de *handover* que implique la asignación de una nueva *S-GW*, el nodo *MME* controla los mecanismos de transferencia de paquetes entre las entidades involucradas.

2.3.2.2.4 Interfaz *S10* (*MME* - *MME*)

La interfaz *S10* permite la comunicación entre dos entidades de red *MME*. Su principal función es la asignación de una nueva entidad *MME* en caso de ser requerida. De esta forma, cuando la entidad *MME* que controla a un determinado equipo de usuario debe cambiarse debido a su movilidad, a través de esta interfaz se realiza la transferencia de dicho usuario entre *MMEs*. La información que se transmite entre *MMEs* está relacionada con la gestión de los servicios portadores, y la gestión de la movilidad, por ejemplo, el área de seguimiento de donde se encuentra localizado el terminal, junto con información de seguridad, claves de cifrado, características del terminal, parámetros de suscripción del usuario obtenidos desde el *HSS*, etc.

2.3.2.2.5 Interfaz *S6a* (*HSS* - *MME*)

La interfaz *S6a* permite la transferencia de información entre la base de datos *HSS* y la entidad del plano de control *MME*. También soporta escenarios de *roaming* (una entidad *MME* de la red de un operador puede acceder a la base de datos *HSS* de otro operador). La interfaz *S6a* se basa en el protocolo *Diameter*. Dentro de las funciones que puede soportar la interfaz *S6a* a continuación se mencionan las siguientes:

- A través de la interfaz *S6a* se actualiza la información en el *HSS* que contiene la identificación del *MME* que controla a los usuarios registrados en la red. Mediante esta interfaz se puede recuperar la información que se encontraba en el anterior *MME* y establecerla en el nuevo *MME* asignado.

- Transferencia de información de los datos de suscripción de los usuarios almacenada en la base de datos *HSS* al nodo *MME* correspondiente. En este caso la entidad *MME* puede autorizar o no la conexión de un usuario a una red externa en función de la lista de redes externas permitidas de acuerdo a la suscripción del usuario.
- Mediante la interfaz *S6a* es posible la autenticación de los usuarios en el *MME* correspondiente.

2.3.2.3 Protocolos en *EPC*

A continuación se describirán las torres de protocolos utilizadas en las interfaces descritas anteriormente, cabe recalcar que muchas de las interfaces están basadas en una misma torre de protocolos. También se detallan los protocolos *NAS (Non Access Stratum)* entre el equipo de usuario y la entidad de red *MME*. Es importante destacar que en la red troncal *EPC* todas las interfaces se soportan sobre una torre de protocolos que utiliza *IP* como capa de red.

2.3.2.3.1 Protocolo *GTP-U*

El protocolo *GTP-U* es usado por todas las interfaces encargadas de transmitir información correspondiente al plano de usuario entre los diferentes elementos de la red troncal *EPC*. La Figura 2.12 muestra la pila de protocolos utilizada en las interfaces que se basan en *GTP-U*. El protocolo *GTP-U* proporciona un mecanismo de encapsulado para el envío de paquetes *IP* de usuario entre nodos de una red *IP*. Los paquetes que corresponden a un mismo servicio portador *EPS* se transportan con un identificador de túnel único denominado *TEID (Tunnel Endpoint Identifier)*.

En base a la Figura 2.13 que se presenta a continuación, se describirá como se realiza la implementación de un túnel entre las entidades *S-GW* y *P-GW* (interfaz *S5/S8*) mediante *GTP-U*. Tal como se observa, los paquetes *IP* del usuario llegan a la entidad *S-GW* provenientes desde el equipo de usuario a través de los servicios portadores radio y *S1*.

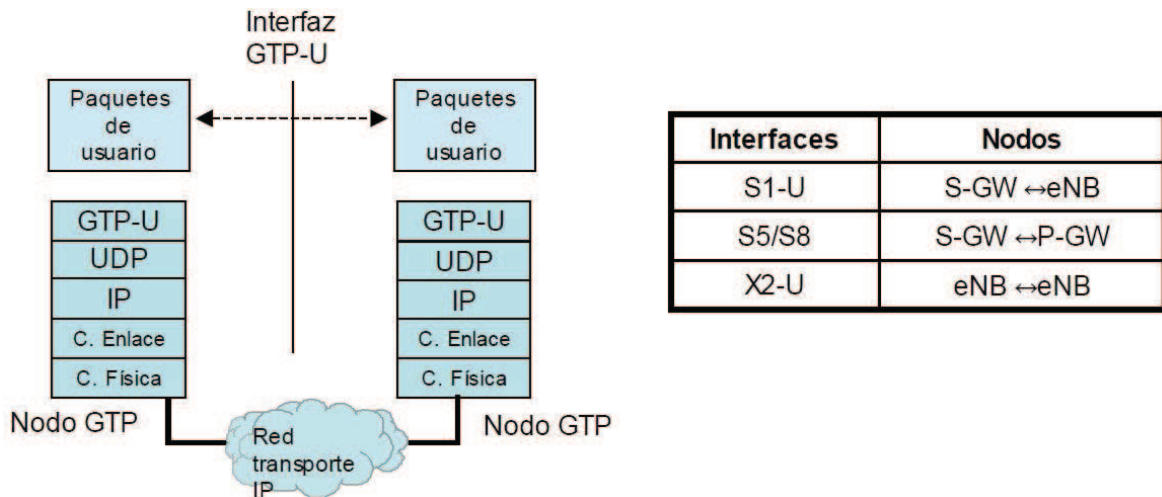


Figura 2.12. Interfaces basadas en *GTP-U* [3]

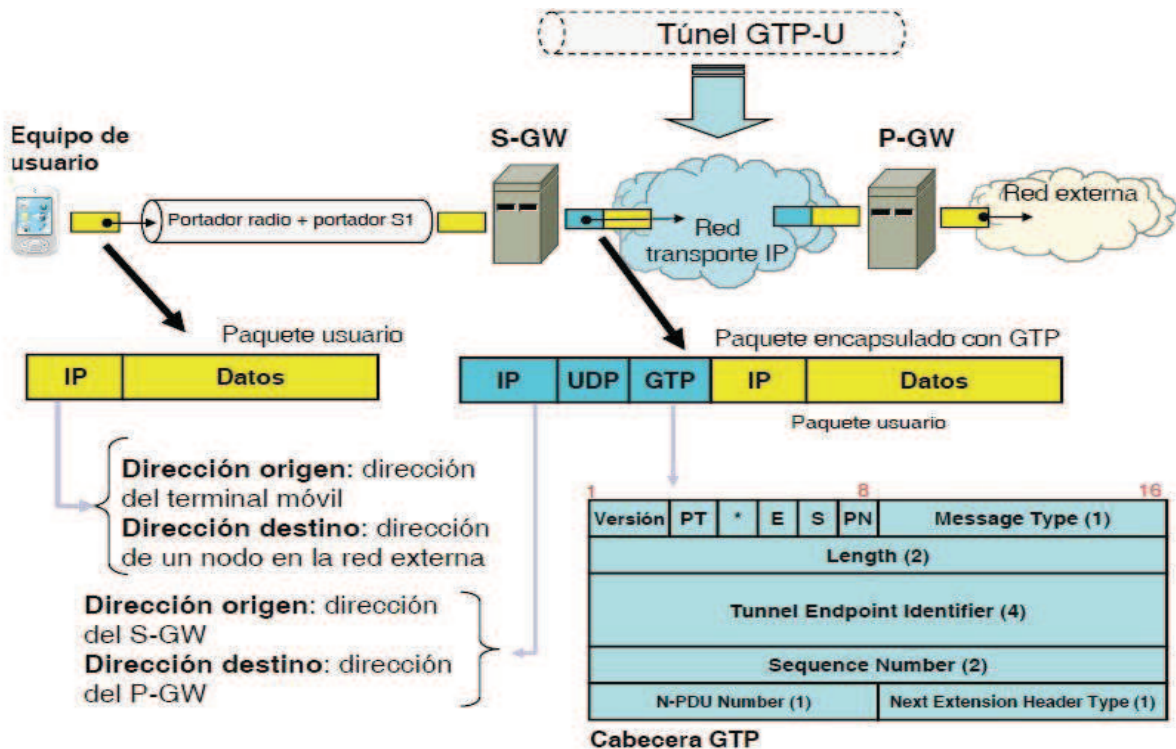


Figura 2.13. Funcionamiento de un túnel *GTP-U* [3]

Las direcciones *IP* origen y destino de los paquetes de usuario recibidos en el *S-GW* contienen, respectivamente, la dirección asignada al terminal móvil y la dirección del equipo de la red externa al que vaya dirigido el paquete. Nótese que estas direcciones no tienen por qué pertenecer al espacio de direcciones *IP* utilizado en la red de transporte que une las entidades *S-GW* y *P-SW*, de ahí la necesidad de establecer el túnel. Para proceder al envío de estos paquetes *IP* de

usuario hacia la entidad *P-GW*, el nodo *S-GW* los encapsula mediante el protocolo *GTP-U*.

La cabecera del protocolo *GTP-U* ocupa un mínimo de 6 *bytes* y contiene el identificador de túnel *TEID*, junto con otros parámetros tales como identificadores de secuencia y longitud del paquete.

El paquete *GTP* resultante tiene como dirección *IP* origen la dirección de la entidad *S-GW* y como dirección destino la dirección *IP* de la entidad *P-GW*. De esta forma, el paquete *GTP* puede ser encaminado en la red de transporte *IP* que une a ambas entidades. Una vez el paquete *GTP* llega a la entidad *P-GW*, ésta extrae el paquete *IP* del usuario y lo inyecta en la red externa.

El establecimiento de un túnel *GTP-U* consiste básicamente en la elección del identificador *TEID* asociado a un determinado servicio portador *EPS* en ambos extremos del túnel. La señalización necesaria para establecer el túnel se realiza mediante otros protocolos como *GTP-C* o *S1-MME*.

2.3.2.3.2 Protocolo *GTP-C*

El protocolo *GTP-C* se encarga de funciones encaminadas a la gestión de sesiones y gestión de movilidad. La versión del protocolo *GTP-C* utilizada en las interfaces de *LTE* es *GTPv2-C*.

- *Gestión de sesiones*. A través de mensajes de señalización especificados para *GTP-C*, la red gestiona la creación de túneles *GTP-U*. Dichos túneles forman parte de la propia gestión de sesiones en la red, mediante el establecimiento, mantenimiento o actualización y liberación de conexiones *PDN* y servicios portadores *EPS*.
- *Gestión de movilidad*. Transferencia de los contextos de información de los usuarios entre las entidades de red en casos de reubicación.

A continuación se ilustra en la Figura 2.14, la torre de protocolos de las interfaces basadas en *GTP-C*.

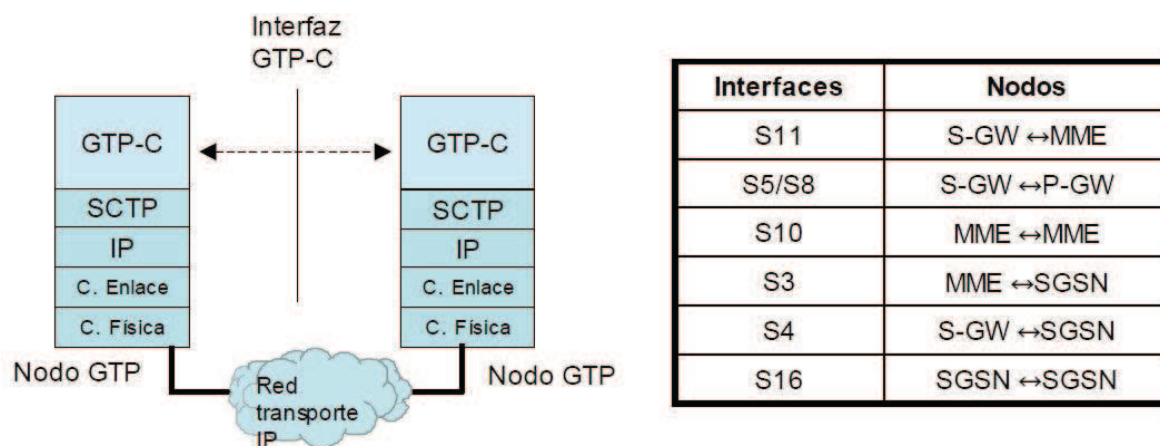


Figura 2.14. Interfaces basadas en *GTP-U* ^[3]

2.3.2.3.3 Protocolo Diameter

El protocolo *Diameter* es la evolución del protocolo *RADIUS* e inicialmente fue desarrollado para sustentar funciones de Autenticación, Autorización y *Accounting* (AAA). En la Figura 2.15 se ilustra la torre de protocolos sobre la que se sustenta *Diameter* junto con una tabla donde se indican todas las interfaces del sistema *LTE* basadas en dicho protocolo. La transferencia de los mensajes *Diameter* entre nodos se realiza a través de un protocolo de transporte orientado a conexión como *TCP* o *SCTP*.

El protocolo *Diameter* se estructura en torno a un protocolo de base llamado *Diameter basestandard* y un número de extensiones denominadas aplicaciones. El protocolo de base aporta en los formatos de los mensajes, en los mecanismos de transferencia de mensajes, en el descubrimiento de capacidades de las entidades *Diameter*, en aspectos de seguridad, etc.; en tanto que las aplicaciones definen los mensajes adicionales y los procedimientos necesarios para adaptar el uso de *Diameter* al soporte de una determinada funcionalidad.

Entre las aplicaciones de *Diameter* más relevantes estandarizadas por *IETF* se

encuentran: Aplicación de un Servidor de Acceso a la Red (*Network Access Server Application*) que es una aplicación de *Diameter* para servicios *AAA* en el marco de control de acceso a redes, y Aplicación para Control de Crédito (*Credit Control Application*) que es una aplicación para la implementación de sistemas de tarificación *on-line*, como sistemas de pre-pago.

Además de *IETF*, otros organismos también pueden llevar a cabo la especificación de nuevas aplicaciones del protocolo, como es el caso de *3GPP*. Estas aplicaciones de *Diameter* se denominan como “*vendor-specific*” y se les asigna un identificador de aplicación a través de *IANA* (*Internet Assigned Numbers Authority*). Así pues, *3GPP* ha definido varias aplicaciones “*vendor-specific*” para la implementación de diferentes interfaces del sistema mediante extensiones del protocolo *Diameter*.

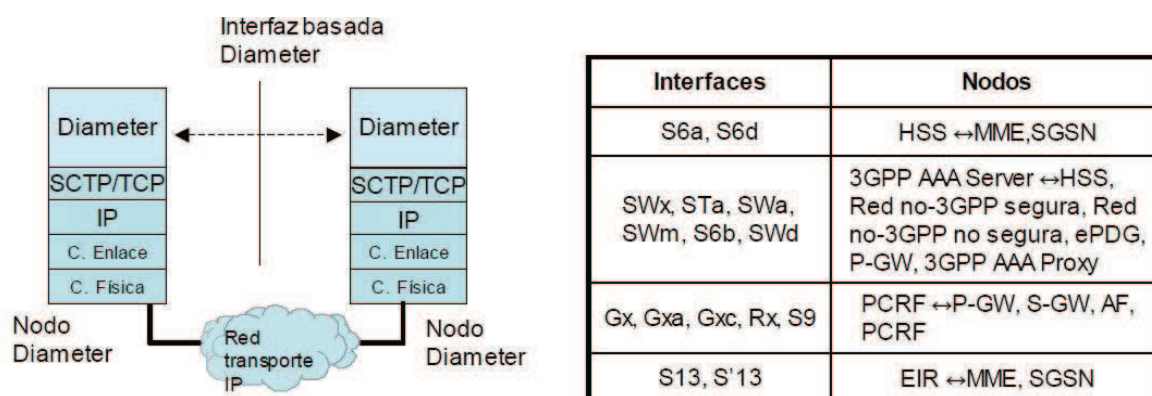


Figura 2.15. Interfaces basadas en *Diameter* ^[3]

2.3.2.3.4 Protocolo *PMIPv6*

El protocolo *PMIPv6* (*Proxy MIPv6*) es un protocolo de capa de red usado para gestionar la movilidad del *UE* y como alternativa al protocolo *GTP* para su utilización en la interfaz *S5/S8* y las entidades de red del *EPC*, *S-GW* y *P-GW*.

PMIPv6 gestiona la movilidad del equipo de usuario de forma transparente. Este modelo de gestión se conoce como “*network-based*”. En la Figura 2.16 se muestran los componentes funcionales del protocolo *PMIPv6*.

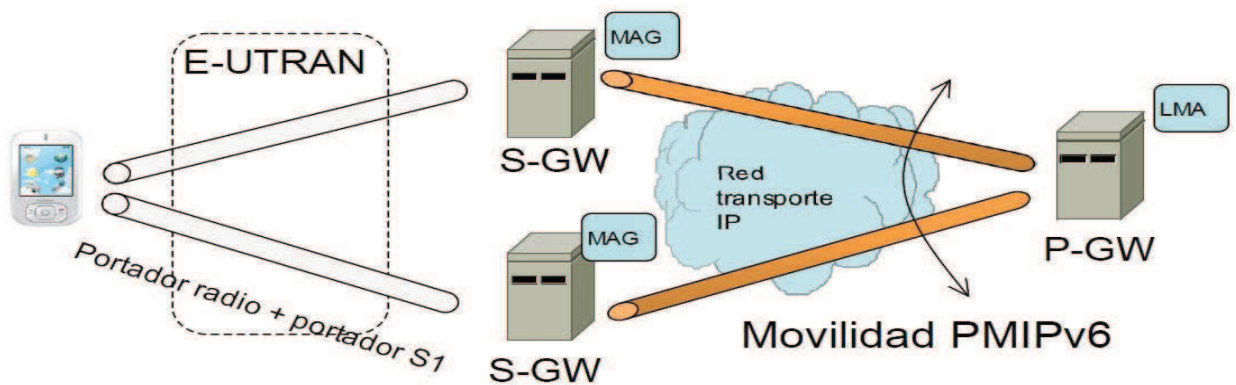


Figura 2.16. Componentes del protocolo *PMIPv6* ^[3]

Para su funcionamiento, *PMIPv6* utiliza la entidad de red *P-GW* como una entidad *LMA* (*Local Mobility Anchor*) y la entidad *S-GW* como *MAG* (*Mobile Access Gateway*).

El *LMA* envía los paquetes del usuario mediante un mecanismo de encapsulado entre la dirección *IP* que tiene asignado el terminal y la dirección *IP* de la entidad *MAG*. Cabe mencionar que la dirección *IP* del terminal no pertenece al espacio de direcciones de la red de transporte que conecta el *LMA* y los *MAGs*.

De esta forma, en la interfaz *S5/S8*, los paquetes *IP* que llegan al *P-GW* (*LMA*) desde una red externa y que tienen como dirección destino la dirección *IP* de un terminal, son encapsulados y enviados mediante un túnel *PMIPv6* a la entidad *S-GW* (*MAG*) y viceversa. Hay que tener en cuenta que la transferencia de los paquetes *IP* entre las entidades *S-GW* y los *UEs* ya no se realizan con este protocolo, se realizan en base a los servicios portadores radio y *S1*.

En la Figura 2.17 se muestra el plano de usuario y el plano de control del protocolo *PMIPv6*, así como también las interfaces en las que es usado.

El plano de control se encarga de la señalización y del control de las direcciones y los túneles necesarios, por su parte el plano de usuario se enfoca en el establecimiento de un túnel que permita enviar de forma transparente los paquetes *IP* de los usuarios entre *MAGs* y *LMA*, para lo cual, los paquetes se

encapsulan mediante el protocolo *GRE (Generic Routing Encapsulation)* el cual añade al paquete *IP* de usuario cabeceras que permiten asociar cada paquete con la conexión *PDN* a la que pertenece.

Cuando se utiliza *PMIPv6* en la interfaz *S5/S8* los servicios portadores *EPS* se extienden entre la entidad *S-GW* y el equipo de usuario. Por el contrario, mediante el uso de *GTP* los servicios portadores *EPS* se extienden desde la pasarela *P-GW* hasta el equipo de usuario.

Además de la interfaz *S5/S8*, el protocolo *PMIPv6* es uno de los protocolos especificados para el soporte de movilidad entre *LTE* y redes que no son *3GPP*.

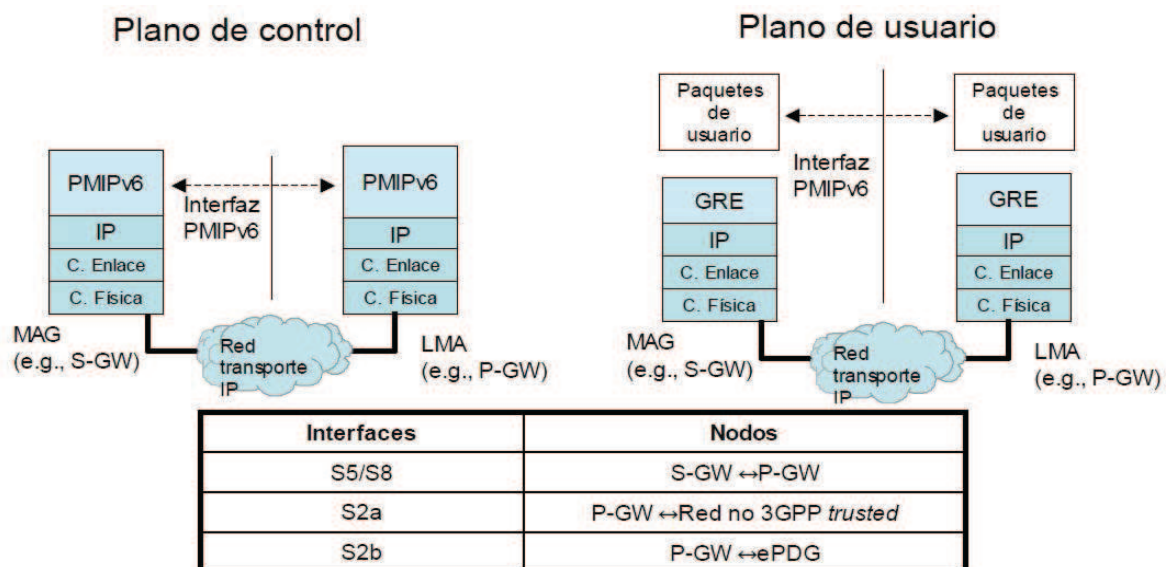


Figura 2.17. Plano de usuario, control e interfaces basadas en *PMIPv6* [3]

2.3.2.3.5 Protocolos *NAS*

Los protocolos *NAS* son protocolos utilizados para la gestión de movilidad de los equipos de usuario (protocolo *EPS Mobility Management, EPM*) y la gestión de sesiones para el establecimiento de la conectividad entre el equipo de usuario y la entidad *P-GW* (protocolo *EPS Session Management, ESM*).

Los protocolos NAS se extienden entre el equipo de usuario y la entidad de red MME. Los mensajes de estos protocolos se transportan de forma transparente en la interfaz radio encapsulados dentro de la parte de datos de los mensajes RRC. En la Figura 2.18 se ilustra el alcance de los protocolos NAS en la red LTE.

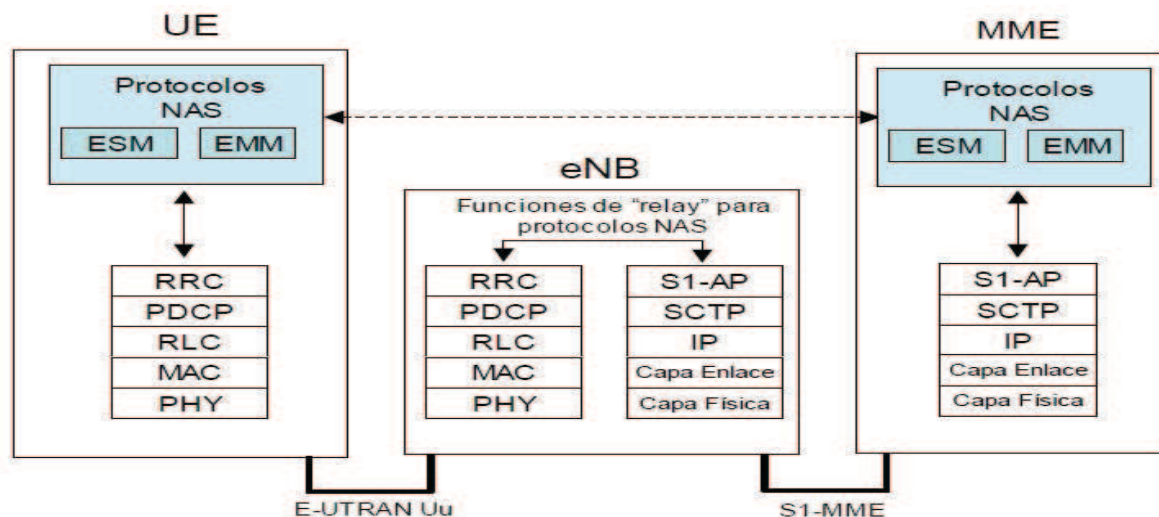


Figura 2.18. Protocolos NAS^[3]

➤ *Protocolo NAS para la gestión de movilidad, EMM*

El protocolo *EMM* se encarga del control de la movilidad de un equipo de usuario, de los mecanismos de "registro" y "cancelación de registro" del usuario en la red *LTE*, y la actualización del área de seguimiento. Cuando los terminales se encuentran en estado *idle*, gracias a este protocolo *EMM* es posible el procedimiento de aviso (*paging*). El procedimiento de aviso lo utiliza la *EPC* para forzar el re-establecimiento de la señalización de control con el equipo de usuario que se encuentre en modo *idle*. El mensaje de aviso se distribuye a los terminales mediante las funciones disponibles en la interfaz *S1-MME*.

El protocolo *EMM* también permite obtener del terminal información basada en identificadores tales como el *IMSI* (*International Mobile Subscriber Identity*) o el *IMEI* (*International Mobile Equipment Identity*) y llevar a cabo

la autenticación del usuario, procedimiento denominado como *EPS Authentication and Key Agreement, AKA*. El procedimiento *EPS AKA* permite la autenticación entre el usuario y la red *LTE*.

Finalmente, el protocolo *EMM* permite enviar información entre el equipo de usuario y la *EPC* mediante mensajes *NA*, por ejemplo, los mensajes *SMS* se envían encapsulados en mensajes *NAS EMM*.

➤ *Protocolo NAS para la gestión de las sesiones, ESM.*

El protocolo *ESM* se encarga de la gestión de los servicios portadores *EPS* entre el equipo de usuario y red *LTE*, es decir, procedimientos de activación, desactivación y modificación de los servicios portadores *EPS*. Estos procedimientos pueden realizarse en cualquier instante de tiempo, solo basta que el terminal se encuentre registrado y tenga establecido un servicio portador. La activación del servicio portador puede realizarse de forma conjunta con el procedimiento de registro, y durante la activación de éste, se puede llevar a cabo la asignación de la dirección *IP* al equipo de usuario.

El protocolo *ESM* también permite que un usuario pueda realizar el establecimiento de una conexión con una red externa y la petición de asignación de recursos. Con respecto a la asignación de recursos, este mecanismo permite que el equipo de usuario pueda disponer de más recursos para poder transferir un flujo de datos basados en determinada *QoS*.

2.3.3 IP MULTIMEDIA SUBSYSTEM (IMS) ^{[3], [18], [19]}

El subsistema *IMS* es una arquitectura integrada en el núcleo de la red *LTE* sobre una infraestructura (servidores, bases de datos, *gateways*) que proporciona los mecanismos de control necesarios para la provisión de servicios multimedia basados en *IP* a los usuarios de la red. El subsistema *IMS* tiene sus orígenes en

la versión 5 del sistema *UMTS*, pero su evolución ha ocasionado que se incremente su campo de aplicación y hoy por hoy es aplicable a otras tecnologías de red, tanto móviles (*LTE*, redes *3GPP2*, *Mobile WiMAX*, etc.), como fijas (*ADSL*, etc.).

IMS es un elemento clave en la arquitectura de *LTE* ya que permite tener acceso a *Internet* mediante la red celular, es usado para acceder a páginas web, leer el *email*, participar en una videoconferencia, etc; también permite gestionar la provisión de servicios tales como voz y video sobre *IP*, presencia y mensajería instantánea, servicios de llamadas en grupo, etc. El acceso de los terminales a dicha infraestructura se realiza a través de los servicios de conectividad *IP* que proporciona la red *LTE*.

IMS también permite interoperar con redes de conmutación de circuitos (*CS*), tales como la *PSTN* o redes celulares existentes y provee soporte para diferentes redes de acceso ya que es considerado como un subsistema independiente. *IMS* fue creado para proveer *QoS* en las sesiones multimedia de tiempo real y de esta manera poder establecer esquemas de tarificación apropiados. También fue creado para realizar la integración de diferentes servicios desarrollados por terceros y de esta manera entregar un nuevo servicio final al usuario.

Los protocolos en los que se basa *IMS* tienen que ver con los protocolos desarrollados en el *IETF*, estos protocolos son creados para la provisión de servicios multimedia en sistemas de comunicaciones móviles, su adopción facilita en gran medida la interconexión de diferentes redes de telecomunicaciones ya sean móviles o fijas, públicas o privadas.

En particular, *3GPP* escogió el protocolo *SIP* (*Session Initiation Protocol*) como protocolo de base para soportar la señalización asociada al subsistema *IMS*. *SIP* es un protocolo para establecer y administrar sesiones multimedia sobre redes *IP* que sigue el modelo cliente-servidor, hereda la mayoría de características de los

protocolos *SMTP*¹⁹ y especialmente de *HTTP*²⁰. Es un protocolo que se concibió en un principio para controlar el establecimiento y liberación de sesiones multimedia (telefonía, videoconferencia, etc.) sobre redes *IP* entre dos o más participantes. Dentro de las aplicaciones de *SIP* se pueden mencionar: mensajería instantánea, juegos distribuidos, control remoto de dispositivos, etc.

Además de *SIP*, en *IMS* se emplean otros protocolos de señalización, tales como *Diameter*, y *H.248*, por mencionarlos, para escenarios de comunicación en los que se interconectan redes *IP* con redes telefónicas convencionales.

En la Figura 2.19 se muestra un modelo de provisión de servicios en base al subsistema *IMS*.

La capa de transporte representa la infraestructura de red *IP*, que proporciona el encaminamiento de los flujos *IP* entre terminales y demás elementos de la red.

En la capa de control se ubican los elementos especializados en la gestión de sesiones tales como los servidores de señalización *SIP*, así como otros elementos específicos para la interacción con redes telefónicas convencionales (*gateways VoIP*, controladores, etc.). Es importante destacar que los servicios de conectividad *IP* proporcionados por la capa de transporte pueden ser controlados desde la capa de control.

Por último, en la capa de aplicación residen los servidores de aplicación de los diferentes servicios proporcionados a través de *IMS*, por ejemplo el servicio de mensajería instantánea, etc. En la capa de aplicación también se pueden encontrar elementos ligados a otras plataformas de servicios como redes inteligentes y pasarelas. A través de estas plataformas se posibilita la provisión de

¹⁹ *SMTP (Simple Mail Transfer Protocol)*: Protocolo para la transferencia simple de correo electrónico, es un protocolo de la capa de aplicación, utilizado para el intercambio de mensajes de correo electrónico entre computadoras u otros dispositivos (*PDA*, teléfonos móviles, etc.).

²⁰ *HTTP (Hypertext Transfer Protocol)*: Protocolo de transferencia de hipertexto, es el protocolo usado en cada transacción de la *World Wide Web*, *HTTP* define la sintaxis y la semántica que utilizan los elementos de software de la arquitectura web (clientes, servidores, *proxies*) para comunicarse.

servicios desde proveedores de aplicaciones externos, denominados como *Application Service Providers, ASPs*.

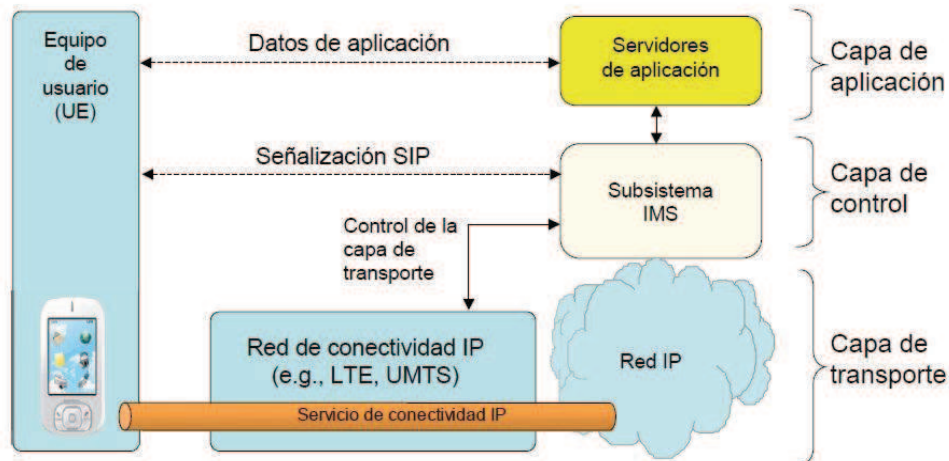


Figura 2.19. Modelo de provisión de servicios *IMS* ^[3]

2.3.4 EQUIPO DE USUARIO ^[3]

El equipo de usuario es el dispositivo que permite a los usuarios acceder a los servicios de la red *LTE* a través de la interfaz radio. La arquitectura de un equipo de usuario *LTE* se muestra en la Figura 2.20. Como se puede ver el equipo de usuario (*User Equipment, UE*) consta de dos elementos básicos: un módulo de suscripción del usuario (*SIM/USIM*) y el equipo móvil (*Mobile Equipment, ME*) cuyas funciones se agrupan en dos entidades funcionales: el terminal móvil (*Mobile Terminal, MT*) y el equipo terminal (*Terminal Equipment, TE*). A continuación se describen cada uno de ellos.

➤ *UICC (Universal Integrated Circuit Card)*

Las *UICC* son *chips* usados en teléfonos móviles y dispositivos externos (módems) tanto para redes *GSM* como redes *UMTS*. La tarjeta inteligente únicamente se refiere al circuito integrado y sus capacidades de comunicación y procesado. Entre los datos que guardan están la agenda

de teléfonos, mensajes cortos *SMS*, datos relativos al abonado para identificarlo en la red, número de suscriptor (*IMSI*) asociado a ese abonado y otros.

Dentro de las aplicaciones que utiliza la *UICC* se encuentran los módulos *SIM* y *USIM* encargados de gestionar los datos de suscripción de los usuarios de las redes *3GPP*.

El *SIM/USIM* es un módulo que se encarga de identificar al usuario en el sistema, independientemente del terminal utilizado. Para acceder a redes celulares *GSM* se utiliza el módulo *SIM* (*Subscriber Identity Module*), mientras que para redes *UMTS* se utiliza el módulo *USIM* (*UMTS SIM*). Adicionalmente la tarjeta *UICC* incorpora un módulo *ISIM* (*IP Multimedia Services Identity Module*) para almacenar información correspondiente a servicios *IMS*.

Estos módulos también guardan datos referentes al usuario, áreas de seguimiento y un conjunto de rutinas específicas para el mecanismo de autenticación. El diseño de estos módulos se realiza de forma que se garantice compatibilidad con los sistemas previos, por ejemplo, un módulo *USIM* puede ser utilizado para acceder a una red *GSM*. En el caso del sistema *LTE*, el módulo utilizado se llama *USIM*.

➤ *Equipo móvil (ME)*

El *ME* se divide en dos entidades, el *MT* y el *TE*. El *MT* se encarga de las funciones propias de la comunicación y el *TE* es el equipo que se encarga de la interacción con el usuario y que contiene muchas aplicaciones. En la Figura 2.20 se puede apreciar dos ejemplos, el primero muestra una integración de los elementos *MT* y *TE*, por ejemplo, un teléfono celular; y el segundo muestra una separación de *MT* y *TE*, por ejemplo un módem y una *laptop*. La separación entre *TE* y *MT* es opcional.

LTE especifica categorías de equipo de usuario dependiendo de las funcionalidades que éstos presenten. Las categorías se establecen en función de la capacidad de transmisión del terminal, multiplexación espacial con múltiples antenas, el uso de determinadas modulaciones, el tamaño en bytes de las colas de transmisión, etc. En la primera versión de *LTE* (Versión 8) se han definido 5 categorías de terminal.

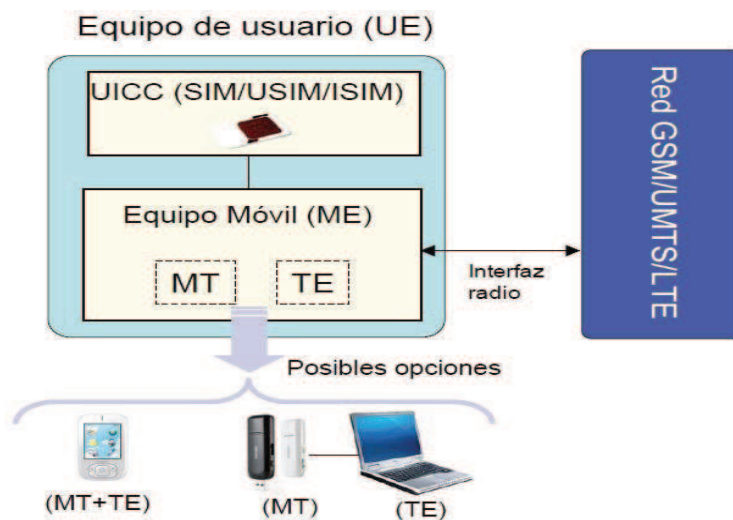


Figura 2.20. Equipo de usuario ^[3]

2.4 INTERFAZ RADIO DE LTE ^[3]

Dentro de la arquitectura de *LTE* ya se había mencionado la interfaz radio. En esta sección se profundizará más acerca de esta interfaz. Entonces para comenzar hay que recordar primero que la interfaz aire permite la interconexión, el envío de tráfico y la señalización entre el terminal móvil y los *eNBs*, para que luego mediante la interfaz *S1* la información transmitida sea cursada por la red troncal. A continuación se presenta la Figura 2.21 que describe a los elementos y protocolos que forman parte de la interfaz radio, esta figura será de mucha ayuda ya que engloba de forma general todo el estudio de la mencionada interfaz.

En la Figura 2.21 se puede ver en primera instancia que el *eNB* se conecta a la red troncal a través de la interfaz *S1*, es decir que el *eNB* sirve de enganche para

que el terminal móvil pueda conectarse con la red de *core* de *LTE*. La torre de protocolos usada en la interfaz aire se puede dividir en dos planos, uno llamado plano de usuario destinado al envío de la información y el otro denominado plano de control encargado de transportar los mensajes de control intercambiados entre la red y el terminal móvil.

El plano de usuario del *eNB* se conecta con la entidad *GW* a través de los Servicios Portadores *S1* para la transferencia de paquetes de usuario entre el *eNB* y la red troncal, dichos paquetes corresponden a mensajes de voz, datos y mensajes de *broadcast* y *multicast*. El plano de control se conecta con la entidad *MME* encargada de las funciones de control de la misma manera que lo hace el plano de usuario.

Hablando a nivel de protocolos y comenzando de arriba hacia abajo, se puede observar que en el *eNB* se encuentra toda la pila de protocolos que permiten que el terminal móvil pueda comunicarse con las estaciones base a través de la interfaz aire. Los protocolos utilizados en el plano de usuario son: *BMC* (*Broadcast/Multicast Control Protocol*), *PDCP* (*Packet Data Convergence Protocol*), *RLC* (*Radio Link Control*), *MAC* (*Medium Access Control*) y los de capa física. De éstos, *PDCP*, *RLC* y *MAC* son protocolos de capa de enlace²¹.

Los protocolos que se utilizan en el plano de control son los mismos que los protocolos de capa de enlace y de capa física usados en el plano de control, solamente se añade el protocolo *RRC*.

Tanto para el plano de control como para el plano de usuario la interrelación de los diferentes protocolos se logra a partir de canales lógicos, de transporte y físicos. Los canales lógicos se usan para mantener una conexión y comunicación entre los protocolos de la capa *RLC* y los protocolos de la capa *MAC*, se utilizan para ver si la información transmitida por la interfaz aire es de datos o de control. Los canales de transporte se establecen entre la capa *MAC* y la capa física y se encargan de multiplexar diferentes canales lógicos en un canal de transporte.

²¹ También se denominan Protocolos de capa 2 o Protocolos de la capa de gestión del enlace.

Finalmente y aunque no se muestra en la gráfica, los canales físicos son los encargados de establecer los mecanismos físicos de transmisión y recepción de la información tanto de datos como de control a través del enlace radio.

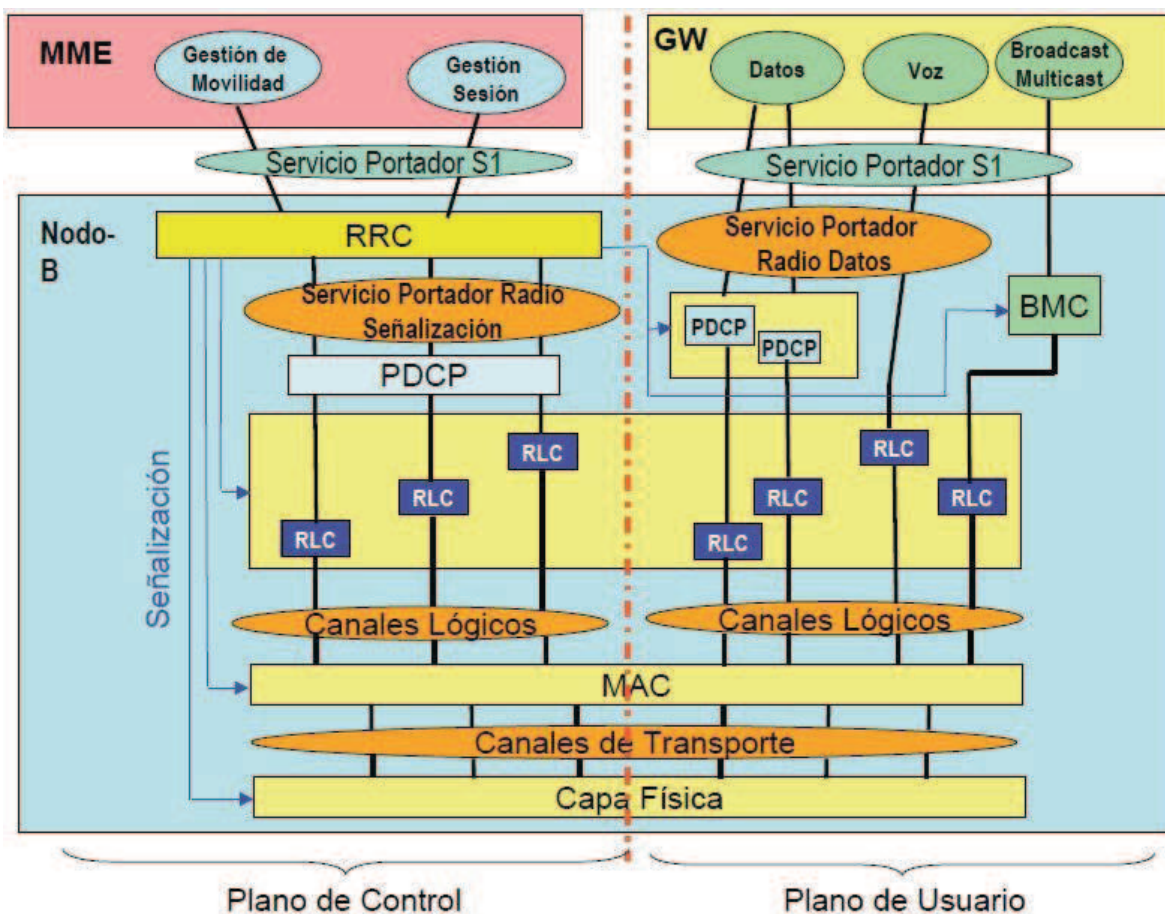


Figura 2.21. Interfaz Radio de LTE ^[3]

2.4.1 DESCRIPCIÓN DE LA PILA DE PROTOCOLOS, CANALES LÓGICOS Y CANALES DE TRANSPORTE

2.4.1.1 BMC (*Broadcast/Multicast Control Protocol*)

Es el protocolo encargado de almacenar y gestionar la transmisión de los mensajes de grupo (*multicast*) o radiodifusión (*broadcast*) hacia el terminal móvil.

2.4.1.2 RRC (*Radio Resource Control*)

Es un protocolo de capa 3 que gestiona funcionalidades a nivel de red permitiendo establecer una conexión de control entre el *eNB* y el terminal móvil, también se encarga del establecimiento, liberación y modificación de los servicios portadores radio. Es el encargado de controlar el comportamiento del móvil cuando éste está en modo activo o conectado, mientras que especifica la señalización de aviso (*paging*) y del Sistema de Información²² cuando el sistema todavía no tiene establecidos los servicios portadores radio. Dentro de las principales funciones de *RRC* se pueden mencionar:

- Radiodifusión de la información generada por el Sistema de Información (*Information System*).
- Procedimientos relacionados con el establecimiento, mantenimiento y cierre de una conexión, incluyendo los mecanismos de *paging*.
- Establecimiento de las portadoras radio de señalización (*Signaling Radio Bearers SRB*) y de las portadoras radio de datos de usuario (*Data Radio Bearers DRB*).
- Establecimiento de los mecanismos de seguridad, integridad y cifrado.
- Soporte para movilidad y señalización de *handover*, *broadcast* de parámetros de sistema y funciones de aviso de los terminales que no disponen de una conexión *RRC* establecida, estos avisos son enviados a través de un canal de *paging*.

2.4.1.3 PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*)

Es un protocolo que se encarga de:

²² Se denomina Sistema de Información (*Information System*) al conjunto de datos transmitidos desde el *eNB* que informan al terminal móvil sobre los detalles de la configuración de la red *LTE*.

- La compresión y descompresión de las cabeceras de los paquetes *IP* que llegan al *eNB*, mediante esta compresión el tamaño de la cabecera se reduce de los 40 octetos típicos a un tamaño entre 1 y 3 octetos.
- Entrega y recepción ordenada de los paquetes *IP* desde y hacia las capas superiores.
- Cifrado de los datos e información de control con una clave de 128 bits y detección de duplicidades de paquetes *RLC*.
- Implementar mecanismos de protección para los mensajes de señalización generados tanto por la capa *RRC* como por los protocolos *Non-Access Stratum (NAS)*.

2.4.1.4 RLC (*Radio Link Control*)

La capa *RLC* permite establecer un enlace fiable de la información a través de la interfaz aire para lo cual implementa procedimientos de segmentación y concatenación de los paquetes *IP* recibidos de capas superiores para adaptar su tamaño a las capacidades de transmisión de la interfaz. También implementa mecanismos de retransmisión de los paquetes recibidos erróneamente, así como evita duplicidades y gestiona que los paquetes recibidos se entreguen ordenados a las capas superiores.

2.4.1.5 MAC (*Medium Access Control*)

MAC es la capa encargada de controlar el acceso al canal radio para lo cual realiza un control de errores mediante *HARQ* y soporta funciones de *scheduling* dinámico entre equipos de usuario atendiendo a prioridades, también multiplexa paquetes *RLC* de diferentes servicios portadores radio en los canales de transporte. Los servicios de transferencia que la capa *MAC* ofrece a la capa *RLC* se denominan canales lógicos. En resumen la capa *MAC* proporciona las siguientes funcionalidades:

- Realiza corrección de errores mediante procedimientos de retransmisión *Hybrid ARQ* o *HARQ*. Éste es un mecanismo, que se aplica sobre los canales de transporte. El procedimiento *HARQ* utiliza técnicas de retransmisión basadas en el incremento de redundancia. Esto es, inicialmente se transmite la información contenida en un canal de transporte con un mínimo de redundancia capaz de corregir los errores que introduce el canal radio. Si en recepción con esta redundancia no basta para corregir los errores, en lugar de volver a retransmitir todo el paquete, como en el caso de las técnicas de retransmisión convencionales, ahora se solicita la transmisión sólo de la información de redundancia adicional, no transmitida anteriormente. Una vez recibida esta información de redundancia adicional, se añade a la ya disponible en el receptor para volver a intentar detectar correctamente la información transmitida por el canal de transporte. Si nuevamente se produce una detección errónea de la información transmitida se repite el proceso hasta que, o bien se recibe correctamente dicho canal de transporte o bien se completa la transmisión de toda la información de redundancia asignada al código utilizado.

Con este mecanismo de transmisión parcial de la redundancia de codificación se busca optimizar el uso del canal radio, transmitiendo la mínima información de redundancia posible para que en recepción se pueda detectar correctamente el canal de transporte transmitido.

- Gestión de prioridades entre canales lógicos utilizando técnicas de gestión dinámica de recursos (*Dynamic Scheduling*).
- Selección del formato de transmisión (tipo de modulación, tamaño del bloque de transporte, etc.) a utilizar por parte de la capa física.
- Multiplexado y demultiplexado de paquetes *MAC* pertenecientes a diferentes canales lógicos en bloques, utilizando para ello los canales de transporte para luego ser entregados a los canales físicos.

- Informar sobre la gestión de los recursos radio para lo cual *LTE* gestiona los recursos de dos formas: gestión dinámica y gestión semi-estática. En el caso de gestión dinámica, utiliza el enlace descendente para enviar mensajes de asignación de recursos y el enlace ascendente para confirmar dicha asignación, subtrama a subtrama. En el caso de asignación semi-estática el procedimiento es similar, sólo que los recursos asignados en el enlace ascendente lo son por un periodo de tiempo mayor que una subtrama. A partir de esta información el *eNB* puede realizar la asignación de recursos más apropiada, tanto en el enlace ascendente como descendente, en función de los requisitos de calidad de servicio asociados a cada flujo de información o servicio establecido.

2.4.1.6 Canales Lógicos

Los canales lógicos se clasifican en canales lógicos de tráfico y canales lógicos de control.

2.4.1.6.1 Canales Lógicos de Tráfico

- *DTCH (Dedicated Traffic Channel – Canal de Tráfico Dedicado)*. Es un canal que se utiliza para transferir información entre el *eNB* y un determinado *UE*, tanto en el enlace descendente como ascendente. La transferencia de información corresponde tanto a información de usuario como de señalización a nivel de aplicación.
- *MTCH (Multicast Traffic Channel – Canal de Tráfico de difusión en grupo)*. Es un canal punto-multipunto que sólo existe en el enlace descendente, es utilizado para transmitir información desde el *eNB* a un grupo de usuarios y para brindar un servicio *MBMS (Multimedia Broadcast and Multicast Service)*.

2.4.1.6.2 Canales Lógicos de Control

- *Broadcast Control Channel (BCCH – Canal de control de difusión)*. Es un canal que sólo existe en el enlace descendente y es usado por el *eNB* para transmitir información sobre el sistema a los terminales móviles, por ejemplo, la identificación del operador, identificación de la celda, la configuración de los canales de control o información de acceso a la red.
- *Paging Control Channel (PCCH – Canal de control de verificación)*. Este canal lógico sólo existe en el enlace descendente y lo utiliza el *eNB* para comunicarse con los terminales móviles de los que conoce su área de localización pero no la celda o *eNB* en la que están ubicados.
- *Common Control Channel (CCCH – Canal de control común)*. Este canal lógico existe tanto en el enlace descendente como ascendente y permite la comunicación entre el *eNB* y el terminal móvil cuando todavía no se ha establecido una conexión a nivel de *RRC*. Se utiliza para enviar información de control en las fases iniciales del establecimiento de la conexión.
- *Dedicated Control Channel (DCCH – Canal de control dedicado)*. Es un canal que existe tanto en el enlace descendente como ascendente, que se encarga de transferir información de control entre el *eNB* y un terminal móvil una vez que ya se dispone de una conexión a nivel de *RRC*. Cabe mencionar que este canal lógico sólo contiene información de control procedente del *RRC* y señalización a nivel de *NAS*, pero no señalización a nivel de aplicación de datos de usuario.
- *Multicast Control Channel (MCCH – Canal de control de difusión en grupo)*. Es un canal punto-multipunto que sólo existe en el enlace descendente y es utilizado para transmitir información de control desde el *eNB* a un grupo de usuarios que reciben servicios *MBMS*.

2.4.1.7 Canales de Transporte

Los canales de transporte se clasifican dependiendo del enlace en:

2.4.1.7.1 Enlace descendente:

- *Broadcast Channel (BCH – Canal de difusión)*. Este canal está asociado con el canal lógico *BCCH*. Tiene un formato fijo, y se transmite en toda el área de cobertura del eNB.
- *Downlink Shared Channel (DL-SCH – Canal compartido para el enlace descendente)*. Este canal transporta información de usuario e información de señalización. Realiza retransmisión usando técnicas basadas en *HARQ* y adaptación dinámica del enlace radio variando la modulación o la codificación. La asignación de recursos radio puede ser de forma dinámica o semi-estática. En el caso de servicio *multicast* y *broadcast*, el canal se puede configurar para difusión en toda la celda o bien en parte de ella utilizando técnicas de conformación de haz (*beamforming*).
- *Paging Channel (PCH – Canal de verificación)*. Este canal se transmite en toda el área de cobertura de la celda y permite mantener una conexión con los terminales móviles así como informarlos de actualizaciones realizadas en el “Sistema de Información”.
- *Multicast Channel (MCH – Canal de difusión en grupo)*. Es transmitido en toda el área de cobertura de la celda y permite el servicio *multicast* y *broadcast*, utiliza una gestión semi-estática de los recursos radio.

2.4.1.7.2 Enlace ascendente:

- *Uplink Shared Channel (UL-SCH – Canal compartido para el enlace ascendente)*: Transporta información de usuario e información de señalización y utiliza técnicas de adaptación dinámica del enlace como

modulación, codificación, potencia de transmisión, así como mecanismos de retransmisión basados en *HARQ*, también permite la asignación de recursos radio tanto de forma dinámica como semi-estática y permite el uso de técnicas de conformación de haz (*beamforming*).

- *Random Access Channel (RACH – Canal de acceso aleatorio)*: Este canal es compartido por los diferentes usuarios de la red y es utilizado para enviar peticiones de acceso al sistema, así como para transmitir mensajes cortos de información de control.

2.4.2 CAPA FÍSICA ^{[3], [4], [5]}

La capa física del sistema *LTE* es la encargada de realizar la transmisión propiamente dicha a través del canal radio. Realiza funciones de codificación de canal, modulación, procesado asociado a las técnicas de múltiples antenas de transmisión y recepción. Los servicios de transferencia que la capa física ofrece a la capa *MAC* se denominan canales de transporte. En el enlace ascendente (Móvil a *eNB*), la capa física se basa en un esquema *Single-Carrier FDMA*. En el enlace descendente (*eNB* a Móvil), el esquema de transmisión es *OFDMA*. Ambos esquemas se analizarán más adelante. En ambos casos la separación entre subportadoras es fija e igual a 15 KHz.

La capa física está pensada para operar por encima de los 450MHz y hasta los 3,5 GHz. El estándar define hasta 40 posibles bandas de operación trabajando bien en modo de duplexión por división de frecuencia (*FDD*) o bien en duplexión por división en el tiempo (*TDD*).

Los posibles esquemas de modulación presentados en la capa física son: *QPSK*, *16QAM* y *64QAM* para el enlace descendente; y, *QPSK* y *16QAM* para el enlace ascendente. También existe la posibilidad de incluir *64QAM* en el *uplink* en función de las capacidades del terminal móvil.

2.4.2.1 Bloque de Recursos Físicos (*Physical Resource Block PRB*)

Se conoce como *PRB*, al mínimo elemento de información que puede ser asignado por el *eNB* a un terminal móvil. El ancho de banda de un *PRB* es de 180 KHz, es decir, 12 sub-portadoras separadas 15 KHz entre ellas en el que se transmiten 6 ó 7 símbolos *OFDMA*, dependiendo de la longitud de prefijo cíclico utilizada. La duración de un *PRB* es igual a 0,5 ms, este período de tiempo también se conoce como duración de un *slot* o ranura temporal.

El número de subportadoras es 12 veces el número de *PRBs* más una. El más uno corresponde a una subportadora que se denomina subportadora central o subportadora *DC* y no se utiliza para transmitir información, se utiliza para la sincronización de la frecuencia del receptor. A continuación se presenta una tabla en donde se puede apreciar el número de *PRBs* asociados a cada ancho de banda y su relación con el número de subportadoras, adicionalmente se incluye la Figura 2.22 que presenta un esquema general del número de subportadoras asociadas a determinado ancho de banda.

Ancho de Banda	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Número de PRB	6	15	25	50	75	100
Número de subportadoras	73	181	301	601	901	1201

Tabla 2.1. Relación entre el número de *PRBs* y el número de subportadoras para los diferentes anchos de banda que maneja *LTE* ^[3]

Para poder calcular la velocidad de transmisión de un *PRB* y después la velocidad de transmisión pico total usando el número total de *PRBs* en determinado ancho de banda se parte de lo siguiente:

- En un *PRB* se dispone de 7 símbolos *OFDM* con 12 subportadoras asociadas a cada uno de ellos, por lo que en total se tienen 84 recursos disponibles para ubicar los símbolos *QPSK*, *16QAM* o *64 QAM*.

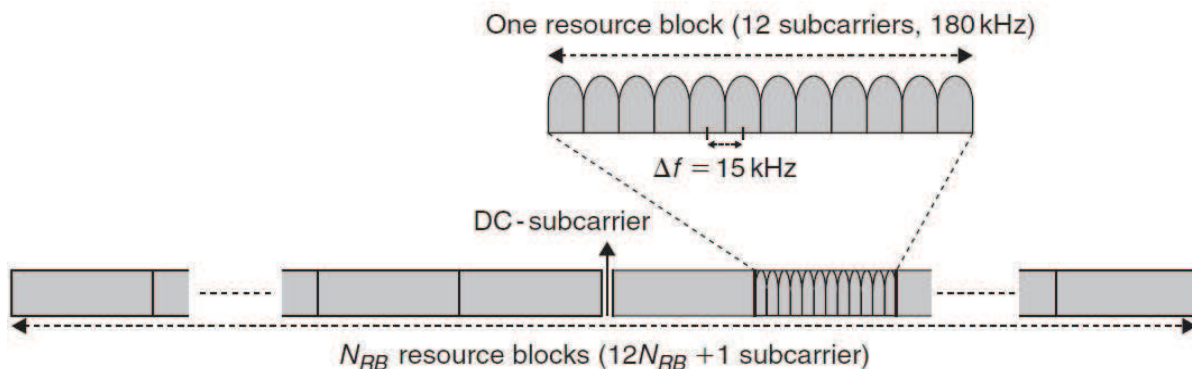


Figura 2.22. Esquema general del número de subportadoras para determinado ancho de banda ^[5]

La Figura 2.23 muestra la estructura de un *PRB*.

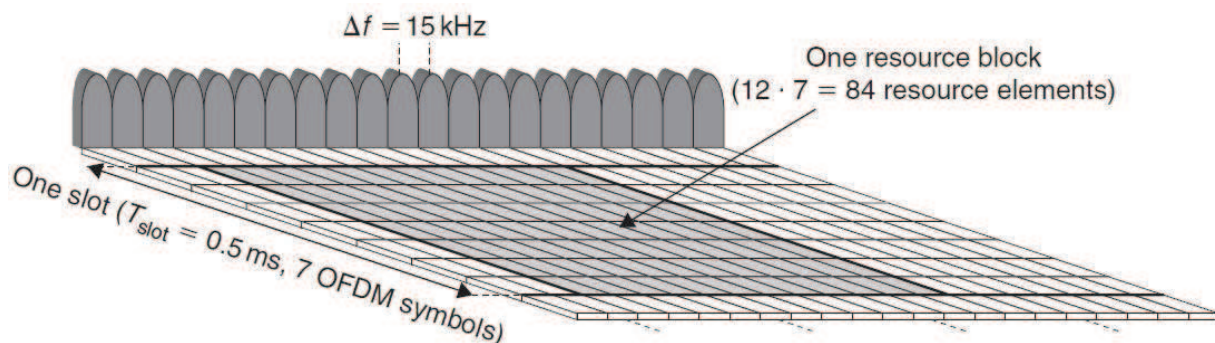


Figura 2.23 Estructura de un *PRB* ^[5]

- Suponiendo que se utiliza la modulación de mayor eficiencia espectral, es decir *64QAM* que transmite 6 bits/símbolo, resulta que en un *PRB* se puede llegar a transmitir hasta 504 bits, incluyendo datos codificados de usuario, canales de control y señalización propia de la capa física del sistema, cada 0,5 ms, lo que proporciona una velocidad de transmisión pico de aproximadamente:

$$V_{tx, PRB} = \frac{504 \text{ bits}}{0,5 \text{ ms}} \approx 1 \text{ Mbps}$$

Las velocidades pico globales en la interfaz aire para los distintos anchos de banda son:

Ancho de Banda	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Número de PRB	6	15	25	50	75	100
Velocidad pico total [Mbps]	≈6	≈15	≈25	≈50	≈75	≈100
Velocidad pico bruta de usuario [Mbps]	≈5.1	≈12.8	≈21	≈42.5	≈63.7	≈85

Tabla 2.2. Velocidad de transmisión pico en la interfaz aire de LTE ^[3]

- Los valores de velocidad pico indicados en la primera fila incluyen tanto los datos de usuario como los canales de señalización del sistema y las señales de referencia.
- Si se estima que los recursos destinados a control y señalización en LTE oscilan alrededor de un 15% aproximadamente del total disponible, entonces en la segunda fila de la Tabla 2.2 se indica las velocidades de transmisión pico brutas o a nivel de capa física por usuario del sistema.
- Estas velocidades corresponden a un sistema sin MIMO. En el caso de considerar una estructura MIMO 2x2 se puede estimar que las velocidades pico serán el doble, es decir, se confirma que la interfaz aire del sistema LTE puede alcanzar los 150 Mbps en el enlace descendente si dispone de un ancho de banda de 20 MHz.
- El cálculo anterior es una primera estimación de las capacidades de transmisión del sistema. Las velocidades pico reales alcanzadas por un usuario dependen de muchos factores, por ejemplo: la calidad del canal radio, el número de usuarios simultáneos en la celda, el tipo de despliegue realizado por el operador, el tipo de servicio considerado, la calidad (QoS) asociada, la capacidad del terminal móvil, etc.

2.4.2.2 Estructura de trama tipo 1 (*SF1*)

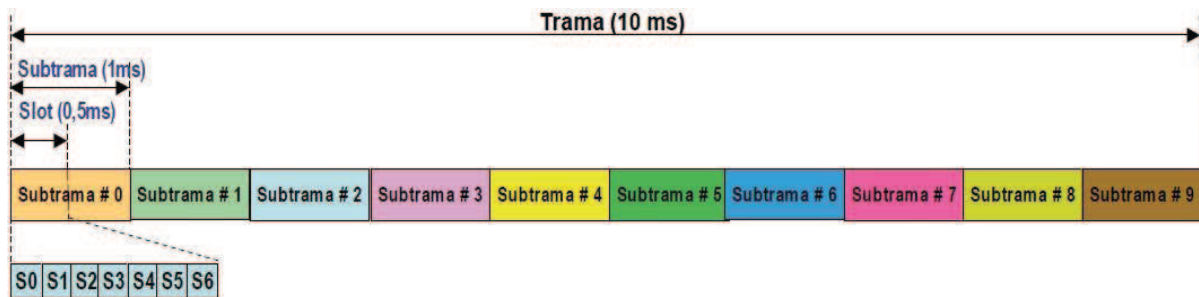


Figura 2.24. Estructura de trama tipo 1 (Modo *FDD*) ^[3]

La trama *SF1* se utiliza en sistemas de duplexado por división de frecuencia (*FDD*) tanto en el enlace descendente como en el enlace ascendente.

Cada trama *SF1* tiene una duración de 10ms, y está compuesta por 20 *slots* de 0.5 ms de duración cada uno. La unión de dos *slots* forma una subtrama cuya duración equivale a 1 ms, tal como lo indica la Figura 2.24.

En cada *slot* se transmiten 6 o 7 símbolos *OFDM* y cada uno de ellos tiene una duración de 66.7 μ s.

Al utilizar 7 símbolos, el prefijo cíclico (*Cyclic Prefix, CP*) se denomina prefijo cíclico normal y tiene una duración de 4,7 μ s, excepto el primer símbolo que tiene un prefijo cíclico de 5,2 μ s. Cuando se utilizan 6 símbolos por *slot*, el *CP* tiene una duración de 16,67 μ s y se denomina prefijo cíclico largo.

Por lo general se utiliza una estructura de trama de 6 símbolos por ranura temporal debido a que los retardos de propagación pueden llegar a ser de algunos μ s, es decir, para compensar los efectos de la propagación multicamino se requiere un mayor prefijo cíclico.

2.4.2.3 Estructura de trama tipo 2 (SF2)

La estructura de trama SF2 opera en el modo *dúplex TDD (Time Division Duplexing)*, es más flexible que la trama SF1 y contiene subtramas de transmisión tanto para el enlace descendente como para el enlace ascendente, también tiene subtramas especiales que contienen símbolos piloto y periodos de guarda entre transmisión y recepción.

Las subtramas especiales se utilizan por razones de sincronización en el proceso de transmisión de información. En el enlace ascendente las transmisiones que se realizan desde el UE hasta la estación base o eNB pueden verse alteradas al sufrir de una pequeña variación temporal lo que obliga a mantener un mínimo de tiempo de guarda entre los datos que se transmiten.

De la misma manera que la *estructura de trama tipo 1*, el eje del tiempo se divide en tramas de 10ms y cada trama a su vez está compuesta por 10 subtramas, cada subtrama tiene una duración de 1 ms.

Una subtrama especial tiene una configuración variable ya que en ésta se pueden distinguir tres campos, tal como se muestra en la Figura 2.25:

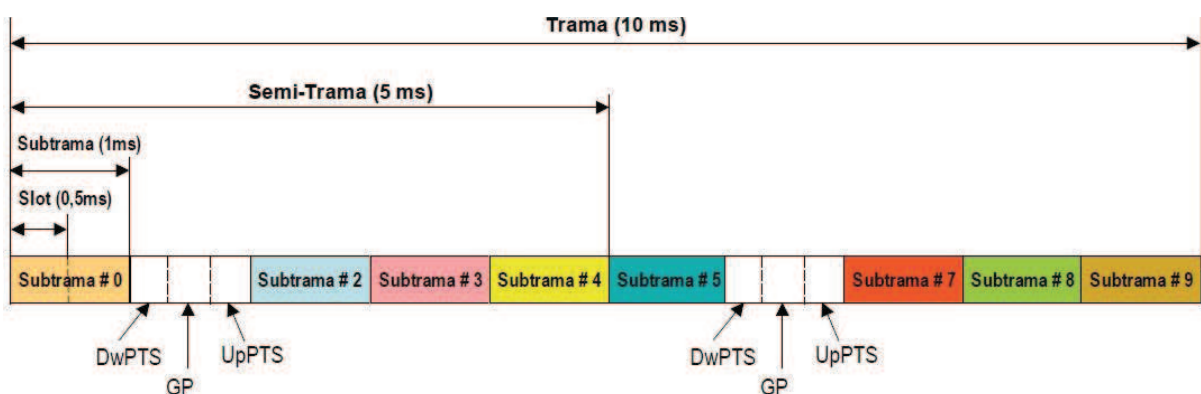


Figura 2.25 Estructura de trama tipo 2 (Modo TDD) ^[3]

- *DwPTS*. Campo utilizado para la transmisión en el enlace descendente, la longitud mínima es 1 símbolo OFDM. El primer símbolo OFDM se utiliza para ubicar la señal de sincronización primaria. Los símbolos restantes de

este campo, si es que existen, pueden transportar señales de referencia o incluso datos.

- *UpPTS*. Se utiliza en el enlace ascendente para transmitir un preámbulo corto de acceso aleatorio (*short RACH preamble*) compuesto por 2 símbolos *OFDM*. Los símbolos restantes de este campo, si es que existen, pueden transportar señales de referencia o incluso datos.
- *GP* o periodo de guarda. Período de tiempo que se reserva entre la transmisión de tramas.

En una trama *SF2* existen 7 combinaciones de ubicación de las distintas subtramas, tal como muestra la siguiente tabla, las subtramas 0 y 5 son siempre para la transmisión en el enlace descendente ya que incluyen a las señales de sincronización utilizadas para la búsqueda inicial de la celda o de celdas adyacentes y la subtrama 1 es siempre de tipo especial.

En la Tabla 2.3 que se presenta a continuación, “D” indica subtrama dedicada al enlace descendente, “U” subtrama dedicada al enlace ascendente y “S” subtrama especial.

Configuración	Periodicidad de la subtrama específica [ms]	Número de Subtrama									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Tabla 2.3. Distintas Combinaciones de las subtramas en modo *TDD* [3], [4]

2.4.2.4 Capa Física: Enlace Descendente

En el enlace descendente se describirán las principales características de las señales físicas que permiten al terminal móvil sincronizarse con el sistema y demodular las señales *OFDMA* transmitidas en el *DL*. También se estudiarán las principales características de los canales físicos que se utilizan para transmitir la información destinada a los usuarios ubicados en el área de cobertura de la celda, y, los mecanismos de señalización y control que permiten una buena transmisión de la información.

2.4.2.4.1 Señales Físicas

Las señales físicas se utilizan con el único objetivo de hacer más fácil la demodulación de las señales *OFDMA* del enlace descendente del sistema *LTE*, para lo cual se han establecido señales de referencia (*RS*) y señales de sincronización temporal (*SCH*), las cuales se presentan a continuación.

a) Señales de Referencia (*RS*)

Las señales de referencia o símbolos piloto se utilizan para:

- Conseguir medidas de calidad en el enlace descendente.
- Estimar la respuesta del canal inalámbrico requerida para el proceso de demodulación.
- Implementar mecanismos de localización de celdas y sincronización inicial.

Las señales de referencia se ubican en una subportadora y un símbolo *OFDM*, y, tienen una separación entre ellas de seis subportadoras.

Al menos se requieren de dos señales de referencia por *PRB*, éstas son: señales de referencia primaria (*RSP*) y señales de referencia secundaria (*RSS*). Las *RSP* están ubicadas en el primer símbolo de un *time slot* (*TS*) y dependiendo de las condiciones del canal radio puede también haber señales *RSS*, que por lo general están situadas en el quinto símbolo de un *TS*.

A continuación en la Figura 2.26, se muestra un ejemplo de la ubicación de las señales de referencia primaria y secundaria dentro de una subtrama, compuesta por dos *PRBs*.

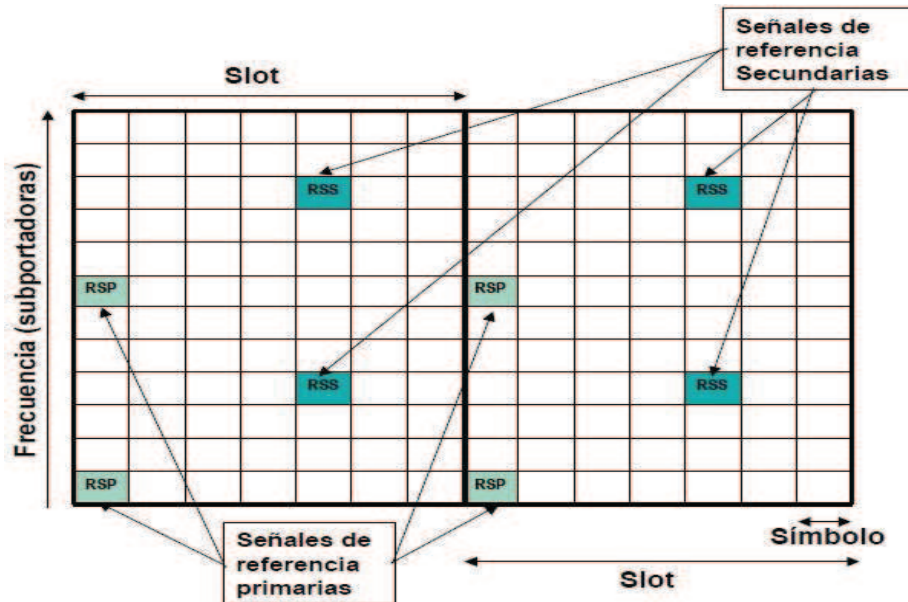


Figura 2.26. Ubicación de las señales de referencia *RSP* y *RSS* ^[3]

b) *Señal de Sincronización (SCH)*

La señal de sincronización (*SCH*) se utiliza para los mecanismos de sincronización principalmente a nivel de trama y a nivel de subtrama. Al conectar el terminal móvil a la red, el primer procedimiento que éste realiza es el procedimiento de sincronización y adquisición inicial de parámetros, las señales de sincronización primaria y secundaria se detectan en primer lugar, de modo que la identificación de celda indicada por estas señales se utiliza para posteriormente identificar en qué recursos se van a situar las señales de referencia primarias y secundarias. Esta señal presenta las siguientes variantes:

- *P-SCH (Primary SCH)*. Permite la sincronización a nivel de subtrama, mediante la relación existente entre la señal recibida y una secuencia de referencia almacenada en el receptor. La señal *P-SCH* se genera a partir de una secuencia de *Zadoff-Chu*²³ de longitud 63 a la que se le ha

²³ Secuencias de *Zadoff-Chu*: Una secuencia de *Zadoff-Chu* es una secuencia matemática de valores complejos que, cuando se aplica a las señales de radio, da lugar a una señal electromagnética de amplitud constante para lo cual se utilizan desplazamientos cíclicos o

eliminado el elemento central, por lo tanto sólo se transmiten 62 símbolos de dicha secuencia. Realmente la señal *P-SCH* ocupa 72 subportadoras ya que se dejan 5 subportadoras vacías a su izquierda y derecha, que actúan como bandas de guarda.

- *S-SCH (Secondary SCH)*. Posibilita la sincronización a nivel de trama, mediante el mismo procedimiento que *P-SCH*. Al igual que *P-SCH* la señal *S-SCH* también se transmite utilizando 62 subportadoras centrales de la banda disponible y se dejan 5 subportadoras vacías a izquierda y derecha que actúan como bandas de guarda. La modulación utilizada en cada subportadora es *BPSK*. Para facilitar la sincronización a nivel de trama, la señal *S-SCH* se transmite dos veces por trama en slots convenientemente espaciados.

Cuando se utiliza una estructura de trama de tipo 1, denominada en el estándar *LTE* como *SF1*, la señal *P-SCH* se transmite utilizando el último símbolo de las ranuras temporales (*TS*) 0 y 10 que corresponden a la primera y sexta subtrama, mientras que la señal *S-SCH* se transmite utilizando el penúltimo símbolo de las mismas ranuras temporales.

Finalmente, si se utiliza una estructura de trama de tipo 2, denominada *SF2* en el estándar, la señal *P-SCH* se transmite utilizando el campo *DwPTS* de la subtrama, mientras que la señal *S-SCH* se transmite utilizando el último símbolo *OFDM* de las subtramas 0 y 5.

2.4.2.4.2 Canales Físicos en el enlace descendente

A continuación se describen las características de los canales físicos de tráfico y los canales físicos de control que se utilizan en el enlace descendente de *LTE*. Hay que tener presente que el sistema *LTE* utiliza canales físicos de tráfico

circulares de una determinada secuencia dando lugar a secuencias ortogonales entre sí, obteniendo múltiples secuencias con buenas propiedades de ortogonalidad a partir de una secuencia raíz.

compartidos, es decir, canales que sólo se establecen cuando un terminal móvil debe recibir datos destinados a él, por lo tanto, se puede hacer el establecimiento de enlaces punto a punto, entre un terminal móvil y la red, o, punto a multipunto, entre la red y múltiples usuarios, es decir una conexión *multicast*.

a) *Canales de Tráfico*

Se clasifican en:

- *Physical Downlink Shared Channel* – Canal físico compartido (*PDSCH*)
- *Physical Multicast Channel* – Canal físico de difusión en grupo (*PMCH*)

a.1) *Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)*

El canal *PDSCH* transmite por lo general información de usuario. En él se transmite información entregada por la capa *MAC* mediante el canal de transporte *Downlink Shared Channel (DL-SCH)*. También transmite los denominados *System Information Blocks* o *SIBs*.

Los esquemas de modulación que se utilizan son: *QPSK*, *16QAM* y *64 QAM*. En general se utilizan turbo códigos de tasa 1/3 para la codificación de canal. El canal *PDSCH* implementa el mecanismo de retransmisión híbrido (*HARQ*). El *Transmission Time Interval* o *TTI* asociado a este canal es 1 ms, es decir una subtrama. Finalmente cabe mencionar que el canal *PDSCH* se mapea utilizando *Physical Resource Blocks (PRBs)*.

a.2) *Physical Multicast Channel (PMCH)*

El canal *PMCH* transporta información *MBMS (Multimedia Broadcast and Multicast System)* en redes iso-frecuencia (*Single-Frequency Networks* o *SFN*), es decir, celdas que dan soporte a este servicio utilizando todas la misma frecuencia. La estructura básica del canal *PMCH* es muy similar a la del canal *PDSCH*. En una misma subtrama no pueden coexistir los canales *PMCH* y *PDSCH*, deben

existir subtramas específicas sólo dedicadas a transmitir el canal *PMCH* cuando el sistema permite usuarios *multicast*.

En las tramas se utiliza siempre el prefijo cíclico extendido, ya que el terminal móvil puede recibir la señal de múltiples *eNBs*, por lo que los retardos debidos a la propagación multicamino de los distintos *eNBs* aumentan. Como la señal transmitida es observada simultáneamente por varios terminales móviles, no es posible aplicar el mecanismo de *HARQ*. Tampoco es posible gestionar de forma dinámica en cada *eNB* los formatos de transmisión y los recursos asociados, ya que todos los *eNBs* que forman parte de la red iso-frecuencia deben enviar la misma señal y de forma sincronizada.

b) Canales de Control

Se clasifican en:

- *Physical Broadcast Channel* – Canal físico de difusión (*PBCH*)
- *Physical Downlink Control Channel* – Canal físico de control (*PDCCH*)
- *Physical Control Format Indicator Channel* – Canal de control *FI* (*PCFICH*)
- *Physical Hybrid ARQ Indicator Channel* – Canal físico *HARQ* (*PHICH*)

b.1) Physical Broadcast Channel (PBCH) [3]

Este canal transporta información básica sobre la red y está compuesto por 14 bits destinados a:

- 4 bits para identificar el ancho de banda utilizado en la celda ya que *LTE* permite anchos de banda desde 1.4 MHz hasta 20 MHz.
- 3 bits para definir la estructura del canal *PHICH* que se utiliza para transportar información *HARQ*.
- 7 bits para identificar el número de trama (*System Frame Number-SFN*).

Los 14 bits más 10 bits de relleno forman un conjunto de bits de transporte al que se añade un código de redundancia cíclico de 16 bits para detectar errores en recepción.

Los 40 bits que se tienen pasan luego a través de un código convolucional de tasa $1/3^{24}$ para dar lugar a 120 bits codificados. Estos 120 bits se repiten 16 veces hasta tener 1920 bits que se transmiten en el canal *PBCH*, esta cantidad de bits se tiene cuando se considera un prefijo cíclico (*CP*) corto (4,7 o 5,2 μ s). Cuando se utiliza un prefijo cíclico largo (16,67 μ s), el procedimiento es el mismo sólo que ahora se utilizan 6 bits de relleno lo que da lugar a la transmisión de 1728 bits codificados.

El canal *PBCH* utiliza modulación *QPSK*, se transmite en 4 tramas consecutivas, es decir con un *TTI*=40ms en las ranuras temporales 0,1 2 y 3 de la primera subtrama, utilizando 72 subportadoras alrededor de la subportadora central o subportadora *DC*, sin señales de referencia, no necesita señalización para ser demodulado y se puede decodificar a partir de una sola recepción.

b.2) Physical Downlink Control Channel (PDCCH) [3]

El canal *PDCCH* transporta *DCIs* (*Downlink Control Information*) que contienen información de asignación de recursos para los canales de aviso (*PCH*) y de tráfico compartido (*DL-SCH*).

Un *DCI* está formado por la agregación de uno o varios *CCEs* (*Control Channel Elements*). Cada *CCE* está formado por 9 conjuntos de cuatro *REGs* (*Resource Element Groups*) relacionadas con la capa física. Por ejemplo, en un *CCE* se puede transmitir el esquema de modulación-codificación utilizado, información sobre el ajuste del control de potencia del enlace ascendente, información sobre el mecanismo de retransmisión híbrida (*HARQ*) y la versión de redundancia aplicada, etc. Cada *REG* se mapea mediante 4 símbolos *QPSK*, es decir ocupa 4

²⁴ Tasa de un código convolucional: es la relación que existe entre los m bits de entrada que ingresan a un codificador y los n bits de salida que se obtienen, en donde se cumple que n es mayor a m.

subportadoras. Entonces, un *CCE* ocupa 36 subportadoras a las que debe añadirse, si es el caso, el número de subportadoras ocupadas por las señales de referencia.

El número de *CCEs* asignados a un canal *PDCCH* lo determina cada *eNB* en función de las condiciones del canal, el número de retransmisiones efectuadas en el enlace ascendente y los recursos de señalización y control necesarios para transmitir los reconocimientos *ACK/NACK* en el enlace descendente.

b.3) Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)

Este canal informa al *UE* si existen uno, dos o tres símbolos utilizados para transmitir el canal *PDCCH*, para lo cual hace uso de un *CFI* (*Channel Format Indicator*). El *CFI* se transmite en cada subtrama en el primer símbolo y está formado por 32 bits (16 símbolos) que se transmiten utilizando una modulación *QPSK*.

El canal *PCFICH* se mapea en cuatro grupos de cuatro subportadoras. La posición del primer grupo de subportadoras es determinada por el valor del identificador de celda (*Cell-ID*) y del ancho de banda del sistema.

b.4) Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH)

El canal *PHICH* transporta los acuses de recibo *ACK/NAK* para implementar el mecanismo de *HARQ* en el enlace ascendente. Un canal *PHICH* está formado por la información *ACK/NACK* de hasta 8 terminales móviles utilizando un prefijo cíclico normal y de hasta 4 terminales móviles en caso de utilizar un prefijo cíclico largo. El canal *PHICH* se mapea en los símbolos *OFDM* de control de cada subtrama en cuatro grupos de cuatro subportadoras repartidas uniformemente. Utiliza modulación *BPSK*.

La información de múltiples usuarios se multiplexa mediante técnicas por división en código utilizando un conjunto de secuencias ortogonales de *Walsh-*

*Hadamard*²⁵ predefinidas. Las secuencias ortogonales tienen un factor de ensanchamiento (*SF*) de valor 4 en el caso de *CP* normal y *SF* de 2 en el caso de *CP* extendido. En la Tabla 2.4 se muestran las posibles configuraciones utilizadas en el sistema.

En el caso de prefijo cíclico normal, hay ocho posibles secuencias ortogonales, cada una de ellas destinada a uno de los ocho posibles terminales móviles. Las cuatro primeras secuencias, son ortogonales entre ellas y se transmiten moduladas en *BPSK* utilizando la componente en fase I, mientras que las cuatro últimas también son ortogonales entre ellas y se transmiten utilizando la componente en cuadratura Q. En el caso de prefijo cíclico largo o extendido, el proceso es el mismo, sólo que ahora las secuencias ortogonales están compuestas por sólo dos bits, y hay cuatro posibles secuencias. Las dos primeras se transmiten moduladas en *BPSK* utilizando la componente en fase I y las dos restantes se transmiten utilizando la componente en cuadratura Q.

Índice de Secuencia	Secuencias Ortogonales	
	<i>CP</i> Normal (<i>SF</i> =4)	<i>CP</i> Extendido (<i>SF</i> =2)
0	+1, +1, +1, +1	+1, +1
1	+1, -1, +1, -1	+1, -1
2	+1, +1, -1, -1	+j, +j
3	+1, -1, -1, +1	+j, -j
4	+j, +j, +j, +j	...
5	+j, -j, +j, -j	...
6	+j, +j, -j, -j	...
7	+j, -j, +j, -j	...

Tabla 2.4. Secuencias de código *Walsh-Hadamard* en el *PHICH* ^[3]

²⁵ Secuencias de código *Walsh-Hadamard*: Los códigos de *Walsh-Hadamard* son familias de códigos binarios ortogonales entre sí que son descifrables a nivel local, proporcionando una manera de recuperar las partes del mensaje original, tan solo analizando a una pequeña fracción de la palabra recibida.

2.4.2.5 Capa Física: Enlace Ascendente

A continuación se presentan las principales características de los canales físicos que se utilizan para transportar la información desde el *UE* hacia el *eNB*, así como los mecanismos de señalización y control que permiten una transmisión adecuada y controlada de la información que generan los terminales móviles. También se incluye una descripción de las señales físicas que permiten al *eNB* sincronizar y demodular las señales *SC-FDMA* transmitidas por los diferentes equipos de usuario bajo el área de cobertura de dicho *eNB*.

2.4.2.5.1 Señales de referencia en UL

Se definen dos señales de referencia para el enlace ascendente:

- *DeModulation Reference Signal* o *DM-RS*
- *Sounding Reference Signals* *SRS*

a) *DM-RS*

Señales utilizadas en la estimación de la respuesta del canal necesaria para permitir la demodulación. Estas señales están asociadas a la transmisión de datos de usuario o información de control, es decir a la transmisión de paquetes *PUSCH* o *PUCCH*, que se describirán más adelante.

Cuando se considera la transmisión de paquetes *PUSCH*, y en el caso que el sistema utilice prefijo cíclico normal, entonces la señal *DM-RS* siempre aparece en el cuarto símbolo *SC-FDMA* de todas las subtramas transmitidas por el usuario y ocupa el mismo número de subportadoras que el bloque de datos de usuario. En caso que el sistema utilice un prefijo cíclico largo, entonces la señal *DM-RS* aparece en el tercer símbolo *SC-FDMA* de cada subtrama. En el caso de considerar paquetes *PUCCH* la posición de las señales de referencia no es fija y depende del formato utilizado.

b) SRS

Son señales de referencia destinadas al sondeo de la calidad del canal de transmisión. Las señales *SRS* no están asociadas a ninguna transmisión de señales de datos o de control en el enlace ascendente. Se utilizan fundamentalmente para que la red pueda conocer el comportamiento del canal y de esta forma facilitar la gestión de recursos radio (*scheduling*). También pueden ser utilizadas para mejorar los mecanismos de control de potencia e incluso facilitar los mecanismos de configuración inicial del terminal móvil.

Estas señales son transmitidas por los terminales móviles en aquellas subtramas que la red les indica mediante mensajes de radiodifusión. La asignación puede ser para una subtrama individual o de forma periódica. Los periodos establecidos en el estándar *LTE* son 2, 5, 10, 20, 40, 80, 160 ó 320 ms. Las señales *SRS* siempre se transmiten en el último símbolo de las subtramas seleccionadas y también utilizan secuencias *Zadoff-Chu*, del mismo tipo que las utilizadas para la señal de referencia *DM-RS*.

2.4.2.5.2 Canales Físicos en el enlace ascendente

Al igual que en el caso de *DL* en el *UL* se identifican tanto canales de tráfico compartidos como canales de control.

a) Canal de Tráfico *Physical Uplink Shared Channel (PUSCH)*

El canal *PUSCH* es utilizado para enviar la información de usuario y se transmite utilizando señales *SC-FDMA* durante una o varias subtramas. El número de subportadoras utilizado lo determina el gestor de recursos radio (*scheduler*) del enlace ascendente. Esta asignación la hace el *eNB* y se transmite al terminal móvil mediante el canal *PDCCH*.

Utiliza modulación *QPSK*, *16QAM* y *64 QAM*. Adicionalmente utiliza un mecanismo de retransmisión híbrido (*HARQ*) a partir de un código de redundancia cíclico (*CRC*) de 24 bits.

Finalmente, es importante subrayar que el canal *PUSCH* no es un canal dedicado, sólo se asigna al usuario cuando éste tiene algo que transmitir en el enlace ascendente y en base a las peticiones que dicho usuario haga a través del canal de control *PUCCH*.

b) Canales de Control

Se clasifican en:

- *Physical Uplink Control Channel* – Canal físico de control (*PUCCH*)
- *Physical Random Access channel* – Canal de acceso aleatorio (*PRACH*)

b.1) Physical Uplink Control Channel (PUCCH)

Transmite información de control del enlace ascendente basada en:

- Peticiones de asignación de recursos (*Scheduling Request*).
- Acuses de recibo *ACK/NACK* para el mecanismo de retransmisión de paquetes en el enlace descendente (*HARQ*).
- Información de la calidad del canal (*Channel Quality Indicator-CQI*) para optimizar los procedimientos de asignación de recursos radio en el enlace descendente.

El canal *PUCCH* se ubica en los extremos de la banda asignada al sistema cada uno de ellos ocupando un recurso físico (*PRB*). Esta ubicación permite que el canal de datos de usuario (*PUSCH*) pueda ocupar toda la parte central de la banda disponible. En un canal *PUCCH* es posible transmitir información de control de múltiples usuarios simultáneamente, para ello se utiliza una técnica de multiplexación ortogonal por división en el código (*CDM*), bien en frecuencia, en tiempo, o en tiempo y frecuencia, para mezclar las diferentes informaciones de señalización transmitidas. El canal *PUCCH* utiliza típicamente modulación *BPSK* y *QPSK*.

b.2) Physical Random Access channel (PRACH)

El canal *PRACH* es un canal físico de acceso aleatorio en el que un *UE* envía un preámbulo para iniciar el procedimiento de conexión al sistema. El preámbulo utiliza secuencias de *Zadoff-Chu*. La señal así resultante es modulada en *SC-FDMA* para ser transmitida en los bloques de acceso. Las secuencias preámbulo que se utilizan parten de una secuencia de *Zadoff-Chu* raíz o secuencia inicial de longitud 839, y se generan por desplazamiento cíclico de dicha secuencia raíz, entonces existe un total de 838 posibles secuencias.

En el caso de operar con la estructura de trama tipo 1 se definen cuatro posibles formatos que se diferencian en la duración del prefijo cíclico (*TCP, Time Cyclic Prefix*) y del preámbulo (*Tpreamb, Time Preamble*), mientras que en el caso de operar con una estructura de trama tipo 2 sólo hay tres formatos posibles. Para la estructura de trama tipo 1 (*SF1*) hay 64 secuencias preámbulo disponibles por cada celda, mientras que para la estructura de trama tipo 2 sólo hay 16. En la Tabla 2.5 se resumen los posibles formatos del canal *PRACH*.

Estructura Trama	Formato	TCP	Tpreamb
Tipo 1	0	0.1ms	0.8ms
	1	0.68ms	0.8ms
	2	0.2ms	1.6ms
	3	0.68ms	1.6ms
Tipo 2	0	0ms	0.133ms
	1	0ms	0.533ms
	2	---	---

Tabla 2.5. Formatos del canal *PRACH* ^[3].

El proceso de acceso aleatorio implica tanto a la capa física como a las capas superiores. Desde el punto de vista de la capa física el procedimiento de acceso a la red se inicia con la transmisión por parte del terminal móvil de un preámbulo de acceso aleatorio. Si el *eNB* detecta correctamente este preámbulo, envía

mediante el canal *PDSCH* una respuesta con un identificador en donde el preámbulo *RACH* se detectó y, con ello se identifica al móvil al que va destinada la respuesta y una asignación inicial de recursos frecuencia–tiempo para poder continuar el procedimiento de acceso. En caso contrario, al cabo de un cierto tiempo aleatorio el móvil repite la operación aumentando la potencia de transmisión y así sucesivamente hasta que el *eNB* detecta el preámbulo.

En lo que respecta a las capas superiores del terminal móvil, éstas eligen, entre las subportadoras disponibles, el conjunto que se va a utilizar para enviar el preámbulo de acceso. Las capas superiores envían a la capa física la siguiente información:

- Bloques de acceso disponibles.
- Formato del preámbulo (qué secuencia utilizar).
- Potencia inicial de transmisión.
- Número máximo de reintentos.
- Aumento o disminución de la potencia.

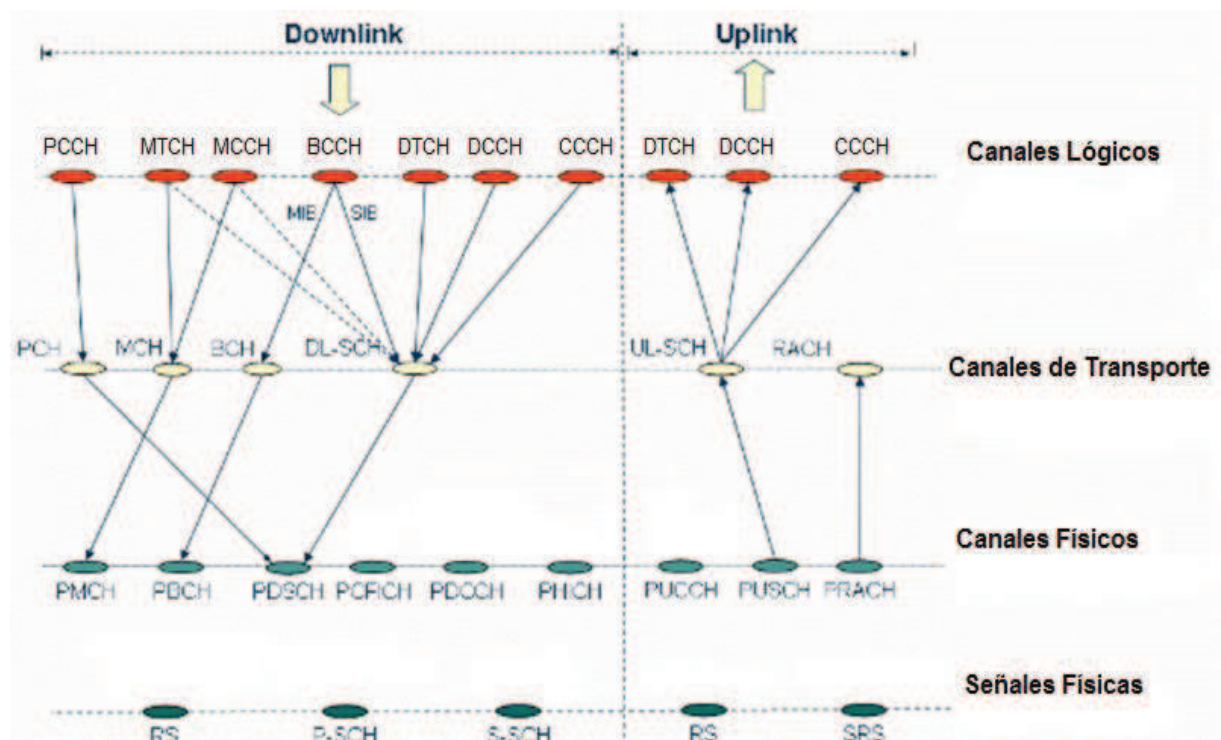


Figura 2.27 Mapeo de canales y señales. ^[36]

Para concluir este apartado en la Figura 2.27 se muestra un resumen completo del estudio de todos los canales descritos anteriormente. En la gráfica se puede apreciar a los canales lógicos, los canales de transporte, los canales físicos y las señales físicas empleadas en el *uplink* y *downlink* respectivamente. También se puede apreciar la relación existente o el mapeo entre canales.

2.5 TECNOLOGÍAS DE NIVEL FÍSICO ^{[1], [2], [3], [20], [28], [33], [34]}

A continuación se presentan los fundamentos de las tecnologías de nivel físico empleadas en *LTE*, las cuales permitirán conseguir mayores niveles de capacidad y eficiencia en el uso de los recursos radio. Se abordará una descripción de las técnicas de acceso múltiple, *OFDMA* (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) y *SC-FDMA* (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*), para lo cual es indispensable primero entender el origen de estas técnicas, *OFDM* (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), finalmente se describirá la tecnología *MIMO* aplicada a *LTE* que abordará temas referentes a estructuras de transmisión y recepción con múltiples antenas.

2.5.1 OFDM (*ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING*) ^{[1], [2], [3], [8], [15]}

OFDM es un esquema de modulación multiportadora que utiliza un gran número de subportadoras para poder transmitir información de datos y control (símbolos) sobre cierto ancho de banda. Gracias a las propiedades de ortogonalidad de las subportadoras, es posible efectuar la transmisión simultánea de todos los símbolos manteniendo la capacidad de separación de los mismos en recepción. Cada subportadora es modulada individualmente mediante esquemas de modulación convencionales tales como *PSK* y *QAM*.

Hoy en día *OFDM* es ampliamente utilizado en aplicaciones de televisión digital, redes inalámbricas de área local, redes cableadas de acceso a *Internet* de banda ancha y constituye la base para la técnica de acceso múltiple *OFDMA*.

El esquema de multiplexación *OFDM* posibilita la multiplexación de un conjunto de portadoras sin el uso de filtros, lo que permite una gran ventaja en el uso del espectro. El procesamiento digital de señal fue fundamental para poder desarrollar esta multiplexación, se utilizaron poderosos *CPUs* (*Central Processing Units*) y *DSPs* (*Digital Signal Processors*) para alcanzar las propiedades de procesamiento requerido.

Las portadoras individuales se llaman subportadoras y la combinación de todas las subportadoras es conocida como portadora *OFDM*. El principal parámetro a tomarse en cuenta en esta portadora es el tiempo de duración de símbolo, definido como:

$$T_s = \frac{1}{\Delta f}$$

Donde:

T_s = Tiempo de duración de un símbolo

Δf = frecuencia de separación entre dos subportadoras

A continuación se muestra un ejemplo de 5 subportadoras *OFDM* con frecuencias f_1 , f_2 , f_3 , f_4 y f_5 respectivamente. Cada subportadora es modulada y finalmente se obtiene un símbolo *OFDM* que corresponde a la suma de todas las subportadoras moduladas. El símbolo *OFDM* en la figura es obtenido asumiendo que todas las subportadoras son moduladas con símbolos de valor 1.

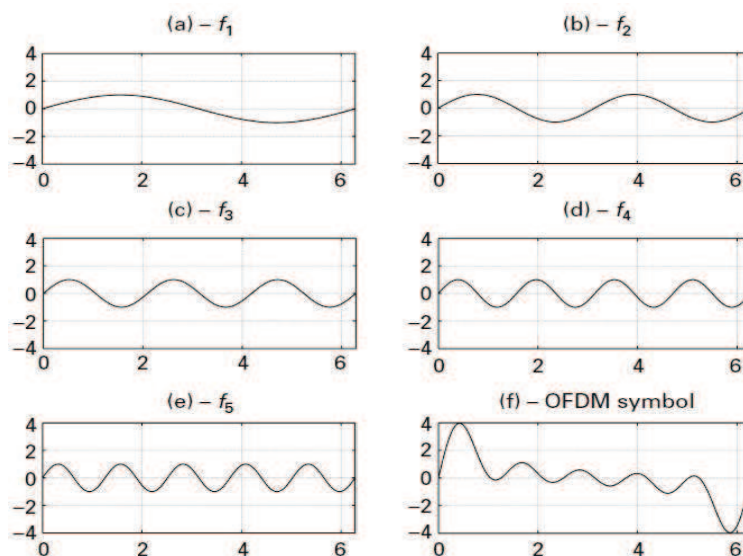


Figura 2.28. Subportadoras y símbolo OFDM [8]

En la Figura 2.29 se puede apreciar que en el dominio de la frecuencia las subportadoras *OFDM* moduladas todas en *PSK* o *QAM* presentan el espectro que se muestra. Aquí se puede apreciar que la componente más importante de cada subportadora modulada no se traslapa con las demás y que entre subportadoras vecinas existe una separación de Δf . Hay que tener en cuenta que la propiedad de ortogonalidad entre subportadoras se consigue gracias a la relación existente entre la separación de las mismas Δf y su duración T_s .

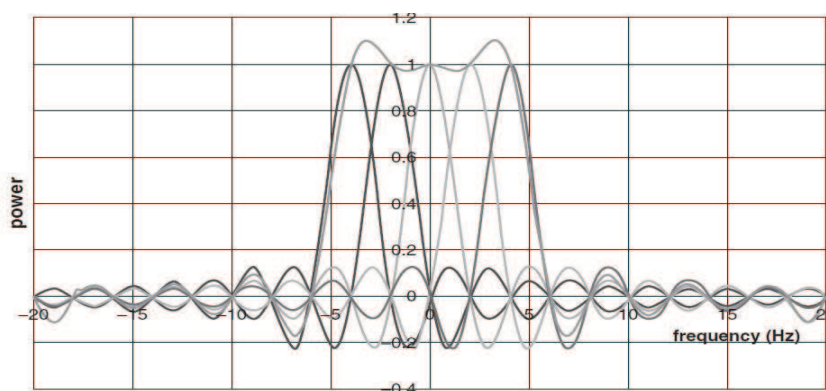


Figura 2.29. Cinco subportadoras formando una portadora *OFDM* ^[1]

2.5.1.1 Prefijo cíclico ^{[1], [3], [8]}

La propagación de señales en un ambiente inalámbrico se ve afectada por fenómenos como reflexión, difracción, propagación multicamino, etc, además de las condiciones en las que se encuentre el terminal móvil en el momento de transmisión y recepción. Estos fenómenos provocan que la señal sea recibida en distintos instantes de tiempo y con diferentes amplitudes y fases. En definitiva es evidente que los efectos de propagación multicamino sobre una señal *OFDM* es la pérdida de ortogonalidad entre las diferentes subportadoras, por tal motivo la ortogonalidad que presentan las subportadoras *OFDM* puede verse afectada cuando la portadora *OFDM* pasa a través de un canal radio dispersivo provocando interferencia a otros símbolos *OFDM*. Para evitar esta interferencia se puede hacer más larga la señal añadiendo la última parte de la señal al comienzo de la señal *OFDM*. Esto es lo que se denomina inserción del prefijo cíclico. Lo mencionado anteriormente se puede apreciar en la Figura 2.30.

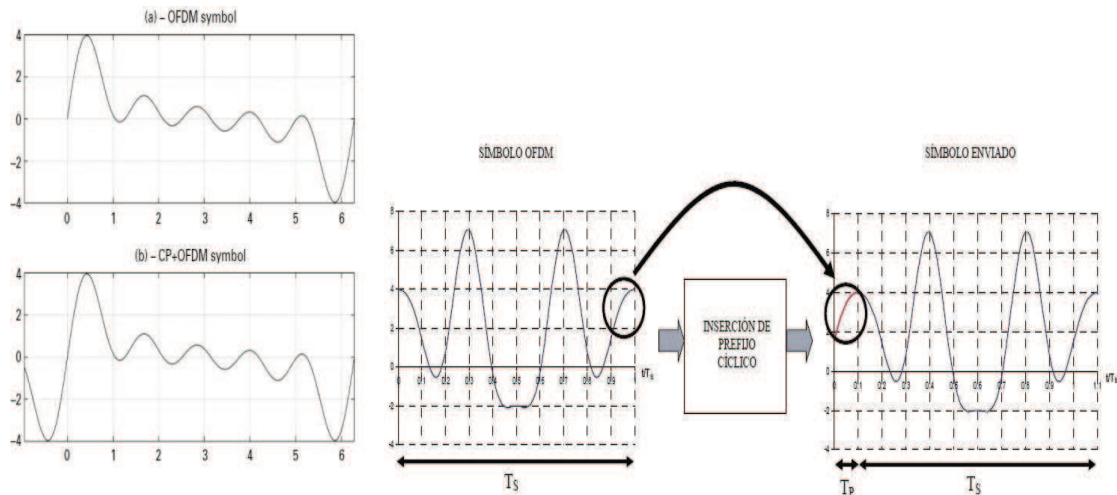


Figura 2.30. Inserción del Prefijo Cíclico CP [3], [8]

2.5.1.2 Modulación $OFDM$ [3], [5], [6], [15]

La Figura 2.31 presenta un diagrama de bloques del procedimiento para realizar una modulación de este tipo.

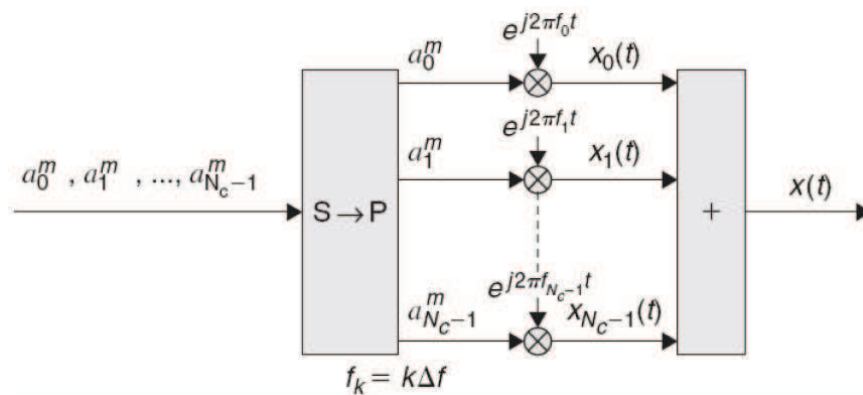


Figura 2.31. Esquema simplificado de la modulación $OFDM$ [15]

Primero se tiene un conjunto de símbolos que ingresan a un convertor serie-paralelo el cual se encargará de separar un flujo serial de bits en sus correspondientes símbolos, una vez que ha sucedido esto, el siguiente paso es usar un banco de moduladores complejo, cada modulador corresponde a una subportadora $OFDM$, cada símbolo modula a la subportadora. Al final se suman todas las modulaciones obteniendo la modulación $OFDM$ requerida.

Para realizar la implementación práctica de un modulador *OFDM* se hace uso de técnicas basadas en la transformada discreta de *Fourier* (*DFT*, *Discrete Fourier Transform*). La Figura 2.32 muestra cómo trabaja un modulador *OFDM* implementado de manera práctica.

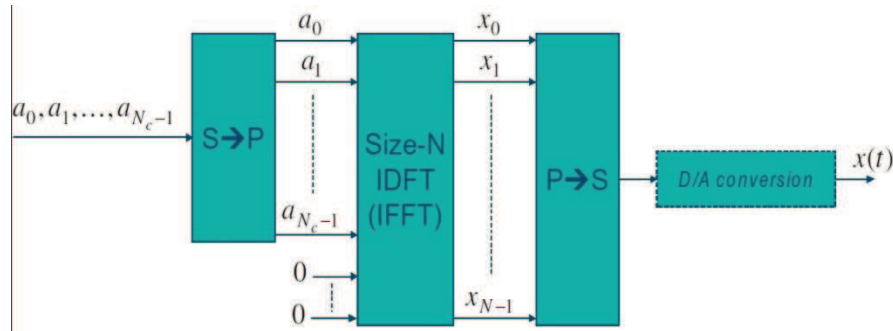


Figura 2.32. Modulador *OFDM* [6]

Como puede observarse, el bloque más importante es el *IDFT* (*Inverse Discrete Fourier Transform*), cuya intención es crear una forma de onda en el dominio del tiempo que represente la suma de todas las subportadoras moduladas. Esta forma de onda es representada por las muestras que salen del *IDFT*.

2.5.1.3 Demodulación *OFDM*

La demodulación se puede apreciar claramente en la Figura 2.33 que se muestra a continuación. Esta figura consta de k ramas diferentes, cada una formada por una multiplicación compleja por la correspondiente subportadora, seguida de una integración en el período de símbolo.

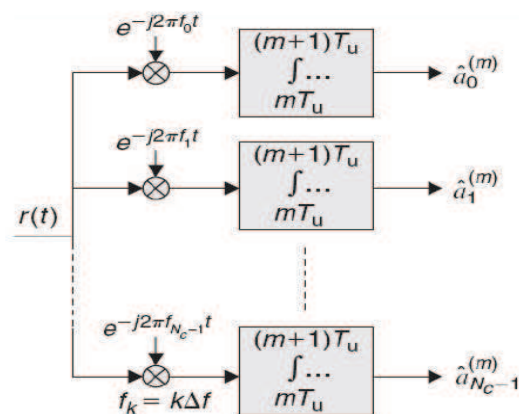


Figura 2.33. Esquema simplificado de la demodulación *OFDM* [15]

La implementación de un demodulador *OFDM* puede verse en el diagrama que se muestra en la Figura 2.34.

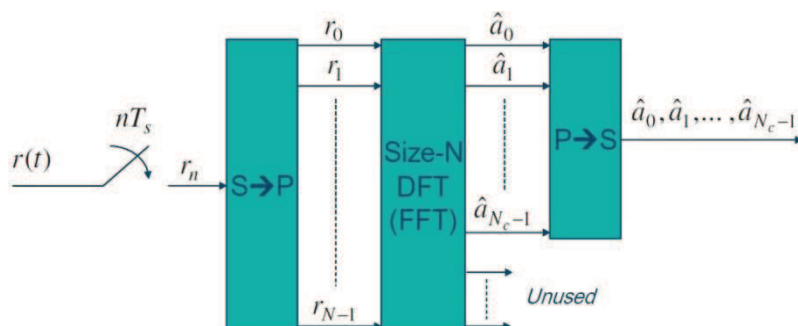


Figura 2.34. Demodulador *OFDM*^[6]

De manera similar al modulador, aquí en el demodulador el bloque más importante es el *DFT (Discrete Fourier Transform)*, cuya finalidad es encontrar las componentes originales que fueron usadas para generar la forma de onda. Lo que se desea obtener a la salida de este diagrama son las componentes de frecuencia de la señal modulada que coinciden con los diferentes símbolos enviados.

2.5.2 OFDMA (ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS)^[3], [4], [9], [10], [11], [13], [20], [21], [22], [23]

OFDMA es una técnica de acceso basada en *OFDM* que se utiliza en el *DL* de *E-UTRAN*. *OFDMA* está basada en la modulación multiportadora y en el acceso múltiple por división de frecuencia.

Las subportadoras en *OFDMA* pueden ser asignadas a diferentes usuarios indistintamente, ello va a depender del servicio que el usuario tenga contratado. Con la asignación de más subportadoras se puede mejorar la calidad de servicio que un usuario tenga asignado, también se puede mejorar la velocidad de transmisión.

Gracias a *OFDMA* es posible enviar varias transmisiones de datos simultáneas de

diferentes usuarios en subportadoras diferentes, tal como lo muestra la siguiente figura.

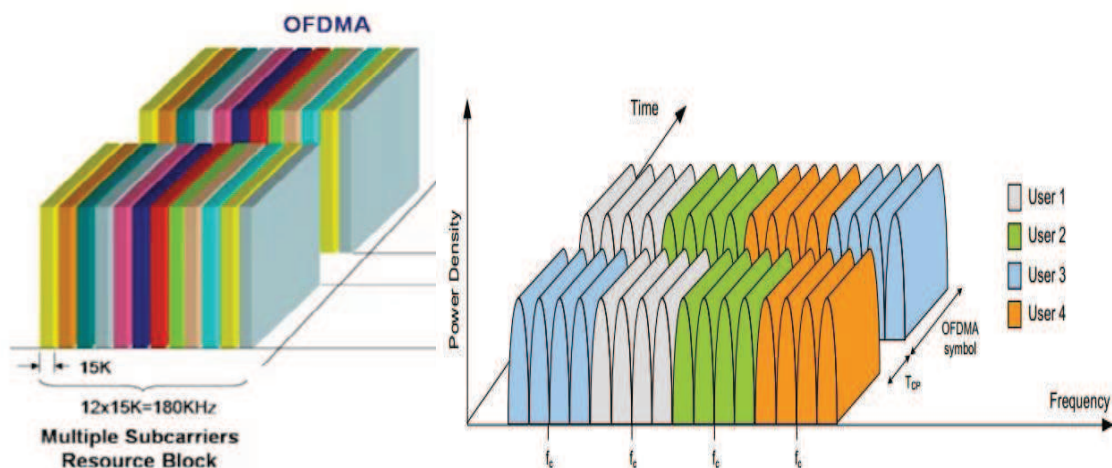


Figura 2.35. Asignación de recursos de diferentes usuarios en OFDMA ^{[17], [22]}

La principal diferencia de *OFDM* con *OFDMA* puede verse en la Figura 2.36. Es claro que ambas utilizan una transmisión multiportadora pero también es evidente que en *OFDM* los símbolos de datos de un mismo usuario son transportados por subportadoras predefinidas para dicho usuario en un intervalo de tiempo a diferencia de *OFDMA* en donde dependiendo de la calidad de transmisión del canal radio se asignan las mejores subportadoras a los distintos símbolos de los diferentes usuarios.

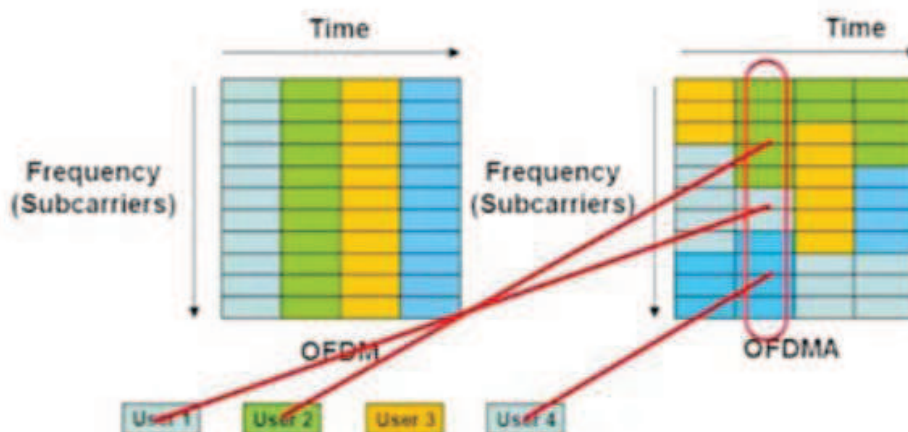


Figura 2.36. Diferencia entre *OFDM* y *OFDMA* ^[22]

En la Figura 2.37 se puede apreciar el funcionamiento de *OFDMA*. En esta figura se asignan varios *PRBs* a distintos usuarios en función de los requerimientos de cada uno.

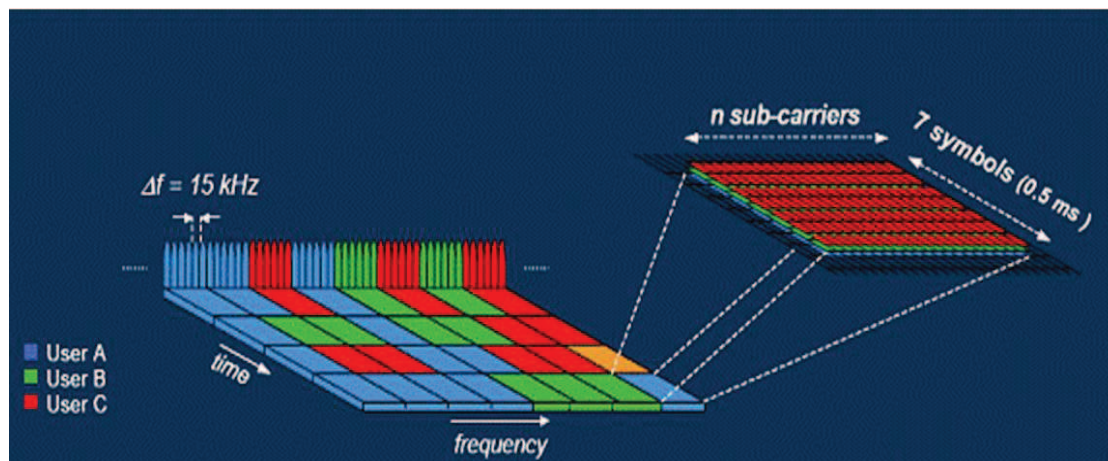


Figura 2.37. Esquema de transmisión *OFDMA* [20]

2.5.2.1 Ventajas de OFDMA

Adicionales a las ya mencionadas por el uso de *OFDM*, a continuación se presentan las siguientes ventajas más relevantes:

- Mediante *OFDMA* la asignación de subportadoras a los usuarios se lleva a cabo dinámicamente, ya que esto depende de las condiciones del canal radio, es decir, la asignación dependerá de la relación señal a ruido que presente el mismo. Esta asignación dinámica involucra un procedimiento denominado *scheduling* en el dominio de la frecuencia. Esto conllevará a una mayor velocidad de transmisión y consecuentemente una mejora en la eficiencia espectral.
- Gracias a la aplicación del prefijo cíclico, la técnica *OFDMA* es muy robusta frente a la interferencia intersimbólica resultante de la propagación multicamino.

- *OFDMA* permite manejar diferentes velocidades de transmisión a los diferentes usuarios en función de los requerimientos de servicio de cada uno, simplemente a base de la asignación de más o menos subportadoras por usuario.

2.5.2.2 Desventaja de OFDMA

Uno de los inconvenientes de *OFDMA* es que la potencia instantánea transmitida puede ser significativamente superior a la potencia media. Esto se puede determinar mediante un factor denominado *PAPR* (*Peak to Average Power Ratio*), que mide la relación entre la potencia instantánea de la señal transmitida respecto de la potencia media. Las señales con un valor alto de *PAPR* requieren amplificadores de potencia altamente lineales para evitar la distorsión asociada a la intermodulación. Para conseguir esta elevada linealidad, el amplificador debe operar por debajo de la potencia pico. El *PAPR* aumenta al incrementar el número de subportadoras utilizadas, lo que plantea problemas de linealidad para los amplificadores de potencia, limitando su eficiencia e incrementando su coste.

2.5.3 SC-FDMA (*SINGLE CARRIER FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS*)^{[3], [4], [9], [10], [11], [13], [15], [17], [20], [23]}

SC-FDMA es una técnica con altas velocidades de transmisión que ha sido adoptado por el *3GPP* para los sistemas móviles *4G* para el enlace ascendente. Este esquema de modulación se basa en la transmisión *OFDM* y se caracteriza porque cada uno de los símbolos es transformado al dominio de la frecuencia mediante la transformada discreta de Fourier (*DFT, Discrete Fourier Transform*) antes de entrar en el bloque de transmisión *OFDM*.

Adoptar este esquema de modulación en el *uplink* es muy ventajoso para reducir el *PAPR* e incrementar la eficiencia de los amplificadores de potencia. El bajo *PAPR* hace que *SC-FDMA* sea la tecnología que se adapte mejor al *uplink* ya que se logra un uso muy eficiente de la energía almacenada en las baterías de los dispositivos móviles.

En *SC-FDMA* se transmite un símbolo de determinado usuario en un conjunto de subportadoras simultáneamente. Todas las subportadoras en el *uplink* son moduladas con el mismo símbolo; la Figura 2.38 muestra que el primer grupo de subportadoras de color verde son moduladas por el mismo dato, por lo tanto se transmiten M símbolos secuencialmente cada uno ocupando todo el ancho de banda disponible y con una duración igual al tiempo de símbolo.

El proceso para llevar a cabo la modulación *SC-FDMA* es como sigue: los símbolos en el dominio del tiempo son convertidos al dominio de la frecuencia usando la Transformada Discreta de Fourier (*DFT*); una vez en el dominio de la frecuencia, son asignados en una ubicación en el ancho de banda del canal antes de ser convertidos de nuevo al dominio del tiempo usando la *Inverse FFT (IFFT)*, finalmente el *CP* es insertado.

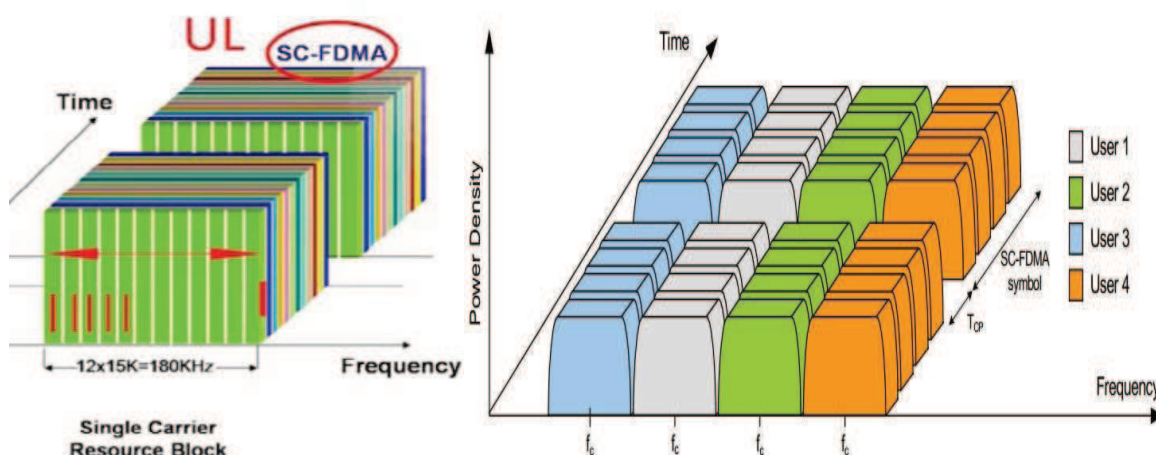
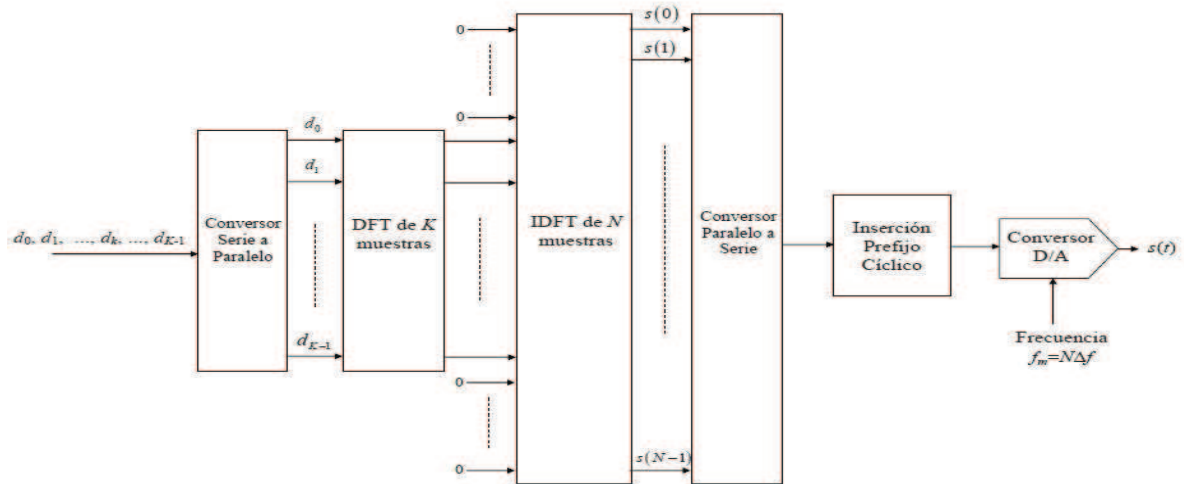
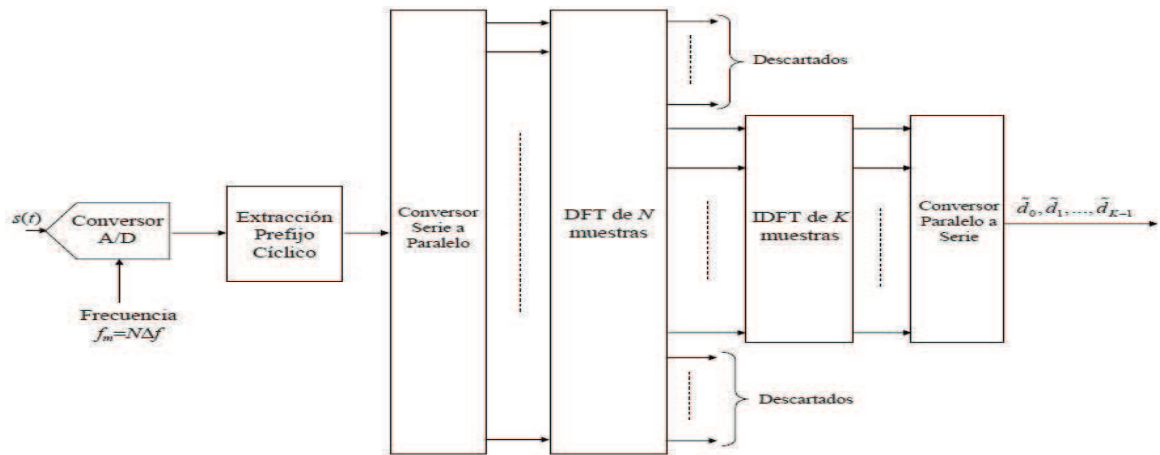


Figura 2.38. Asignación de recursos de diferentes usuarios en *SC-FDMA* ^{[17], [22]}

A este tipo de modulación también se la conoce como *Discrete Fourier Transform Spread OFDM (DFT-S-OFDM)* por el proceso descrito anteriormente. En recepción la demodulación se produce de manera inversa. La Figura 2.39 muestra el esquema de transmisión y recepción *SC-FDMA*.



(a)



(b)

Figura 2.39. (a) Trasmisión y (b) Recepción en SC-FDMA [3]

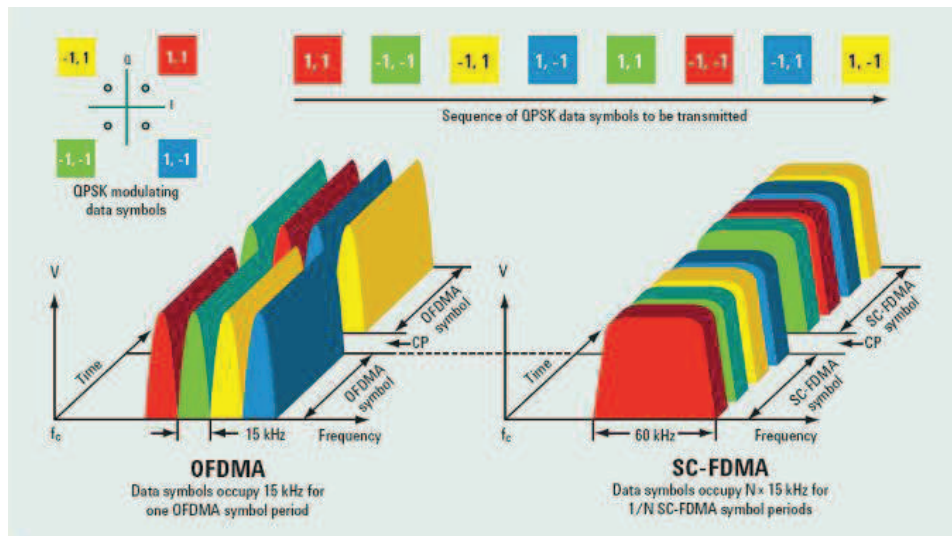


Figura 2.40. OFDMA y SC-FDMA [20]

2.5.4 COMPARACIÓN ENTRE *OFDMA* y *SC-FDMA* ^{[4], [20]}

Para poder relacionar y entender los diferentes esquemas de modulación presentados anteriormente, a continuación se muestra en la Figura 2.40 las características más relevantes que permitirán entablar una diferencia en el uso de técnicas de acceso tanto para el *uplink* como el *downlink* de *E-UTRAN*.

La figura muestra una comparación entre *OFDMA* y *SC-FDMA*. Por motivos de ilustración, en esta figura no se ha tomado en cuenta el uso de *PRBs*, por el contrario solo se muestran cuatro subportadoras y dos períodos de símbolo *OFDMA* o *SC-FDMA* con datos representados por modulación *QPSK*.

En el lado izquierdo de la Figura 2.40 se encuentran las cuatro subportadoras mencionadas, donde cada una de ellas ocupa un ancho de banda de 15 KHz del ancho de banda total del canal que para este caso sería de 60 KHz, estas subportadoras son moduladas en un período de símbolo *OFDMA* de 66.7 μ seg por símbolos *QPSK* y por lo tanto solo la fase de cada subportadora es modulada. Con respecto a la potencia de las subportadoras, éstas permanecen constantes entre los distintos símbolos.

Después de que un período de símbolo *OFDMA* haya terminado, se realiza la inserción del prefijo cíclico y se continúa con el siguiente. Como ya se mencionó anteriormente para crear la señal transmitida se requiere de un proceso de *IFFT* sobre cada subportadora, para así poder crear las señales en el dominio del tiempo que finalmente serán sumadas, en contraste con *SC-FDMA* en donde la generación de la señal comienza con un proceso de precodificación especial pero que luego continua de manera similar a *OFDMA*.

La diferencia más evidente entre los dos esquemas es que *OFDMA* transmite los cuatro símbolos *QPSK* en paralelo, uno por subportadora, mientras que *SC-FDMA* transmite los cuatro símbolos *QPSK* en serie de cuatro veces la velocidad, con lo que cada símbolo de datos ocupa más ancho de banda, en el ejemplo cada símbolo ocupa 60 KHz de ancho de banda.

Visualmente, la señal *OFDMA* es claramente multiportadora con un símbolo de datos por subportadora, pero la señal *SC-FDMA* viene a ser más como una portadora única *single-carrier*, por lo tanto de ahí el nombre de la modulación, ya que cada símbolo de datos es representado por una gran señal que agrupa a todas las subportadoras.

Finalmente, destacar que el tiempo de duración de los símbolos *OFDMA* y *SC-FDMA* son los mismos, es decir 66.7 μ seg y que la transmisión paralela de múltiples símbolos es lo que crea en *OFDMA* el alto y no deseable *PAPR* a diferencia de *SC-FDMA* en donde el *PAPR* es bajo.

2.5.5 MIMO [4], [9], [10], [11], [12], [13], [15], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32]

Las señales al ser transmitidas en un medio inalámbrico sufren de ciertas alteraciones debido a que tienen que atravesar diferentes obstáculos como edificios, árboles, en fin, objetos que se encuentren en el lugar de la transmisión. Al pasar la señal por estos objetos presenta ciertos efectos como la reflexión, difracción y dispersión provocados por la propagación multitrayectoria. Como puede darse cuenta la señal se divide y puede tomar muchos caminos para llegar al destino lo que provoca que las señales transmitidas lleguen desfasadas y atenuadas. En recepción la llegada tardía de todas las partes que conforman la señal original puede originar desvanecimiento en dicha señal y provocar una disminución en la velocidad de transmisión y un aumento en el número de errores. Para combatir estos fenómenos que son inherentes al canal inalámbrico de transmisión se desarrolló una técnica basada en múltiples antenas que en lugar de combatir la propagación multicamino, la aprovecha, de esta manera es posible incrementar la velocidad, cobertura y fiabilidad de las señales.

Las técnicas *MIMO* se han desarrollado como una solución para proporcionar altas tasas de transmisión explotando las características de propagación multitrayecto de un canal inalámbrico, tal como se ha mencionado anteriormente. Esto se debe al uso de muchas antenas tanto para la transmisión como para la recepción así, como también a su distribución en el espacio, es por ello que se

usa el término *Multiple Input Multiple Output: MIMO*. *MIMO* aprovecha la diversidad de caminos de propagación entre diferentes antenas. Cuando las señales se combinan apropiadamente en el receptor, la calidad de la señal o la velocidad de transmisión de cada una se mejorará notablemente.

2.5.5.1 Definición de MIMO^[31]

“MIMO o Multiple Input Multiple Output es una tecnología que se refiere específicamente al uso de múltiples señales que viajan simultáneamente y a la misma frecuencia por un solo canal de radiofrecuencia, y que aprovecha la propagación multicamino para incrementar la eficiencia espectral del sistema de comunicaciones inalámbrico. Esto lo consigue a través del uso de diversidad de antenas, distintas técnicas y complejos algoritmos de tratamiento digital de señales en ambos extremos del enlace: extremo transmisor (múltiple entrada) y extremo receptor (múltiple salida). Esta definición del término es la más adecuada ya que se apoya en numerosos artículos de investigación, publicaciones, libros y conferencias de diferentes expertos en la materia.”

2.5.5.2 Diversidad en el espacio

La diversidad en el espacio es la primera estructura con varias antenas ampliamente usada en comunicaciones móviles cuando se utilizan diferentes caminos de propagación para transmitir la señal, esto se consigue mediante diversidad de antenas, es decir, usando varias antenas transmisoras (diversidad en transmisión) y varias antenas receptoras (diversidad en recepción) tal y como lo muestra la Figura 2.41.

Según el número de antenas que hay en ambos extremos de la comunicación se pueden mencionar los siguientes sistemas, los cuales son puntos de partida para la tecnología *MIMO*:

- *SISO (Single Input, Single Output)*: sistema que utiliza una antena transmisora y una antena receptora.

- *MISO (Multiple Input, Single Output)*: sistema que utiliza dos o más antenas transmisoras pero solo una antena receptora. También se le conoce como diversidad en transmisión.
- *SIMO (Single Input, Multiple Output)*: sistema que utiliza una sola antena de transmisión y dos o más antenas para recepción. Se le conoce como diversidad en recepción.
- *MIMO (Multiple Input, Multiple Output)*: sistema de comunicaciones que utiliza dos o más antenas en el transmisor y dos o más antenas en el receptor, es decir utiliza tanto diversidad en transmisión como en recepción.

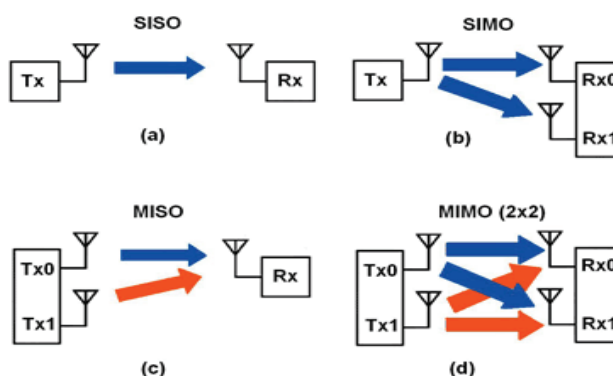


Figura 2.41. Diversidad Espacial ^[30]

2.5.5.3 Técnicas de transmisión de MIMO

Las técnicas de transmisión que utiliza *MIMO* son: diversidad de antenas, multiplexación espacial y *beamforming*.

2.5.5.3.1 Diversidad de Antenas

A continuación se describirá la diversidad de transmisión como punto fuerte en el análisis de sistemas *MIMO*.

Diversidad de Transmisión.- Se tiene diversidad de transmisión cuando se usan dos o más antenas en el transmisor. Existen varios tipos de diversidad de transmisión.

MIMO utiliza las técnicas *Space-Time Coding (STC)*, codificación espacio-tiempo. *STC* se basa en transmitir redundantes copias codificadas de una trama de datos, para que al menos una de ellas llegue al receptor en buen estado y poder realizar una decodificación fiable. Estas copias son distribuidas a lo largo del tiempo y entre todas las antenas transmisoras disponibles. Hay dos tipos de *STC*: *STBC* y *STTC*.

- *STBC-Space Time Block Coding o Codificación Espacio Temporal en Bloques.*- En este tipo de codificación, la secuencia de datos a transmitir se divide en bloques de bits que se introducen juntos en un codificador. La salida es otro bloque de bits que ya contiene redundancia.

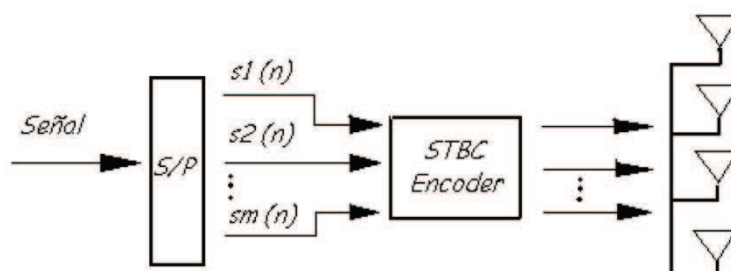


Figura 2.42. Codificador *STBC* ^[32]

- *STTC-Space Time Trellis Coding o Codificación Espacio Temporal de Trellis o Convolutacional.*- En *STTC* la secuencia de datos a transmitirse es codificada con un código convolutacional *Trellis*. Este tipo de codificación tiene la capacidad de corregir errores en el lado del receptor sin tener que retransmitirse la información original, esto se consigue añadiendo al mensaje original bits adicionales de redundancia. Esta codificación es del tipo *FEC (Forward Error Correction)*.

2.5.5.3.2 Multiplexación Espacial (Spatial Multiplexing - SM)

La codificación utilizada se basa en Códigos Espacio Temporales en Capas (LSTC) también llamados *BLAST (Bell Labs Layered-Space Time)*. En *SM* se transmiten flujos de información independientes por cada antena a la misma frecuencia, es decir, se divide el flujo de datos inicial en tantos flujos como antenas disponibles hay.

A cada uno de estos flujos se los denomina capas o *layers*. Cada *layer* es codificada de forma independiente. Después son transmitidas simultáneamente todas las *layers* y en la misma banda de frecuencia. El objetivo del multiplexado espacial es maximizar la velocidad de transmisión y por ende la capacidad del sistema, lo que conllevaría una mejor eficiencia espectral.

La Figura 2.43 muestra claramente que la multiplexación espacial es la combinación de varias señales de menor ancho de banda en una señal de mayor ancho de banda y viceversa en el caso de la demultiplexación espacial. La multiplexación espacial es el número de flujos de datos transmitidos paralelamente. Para concluir, es necesario destacar que la multiplexación espacial va de la mano con la diversidad de antenas.

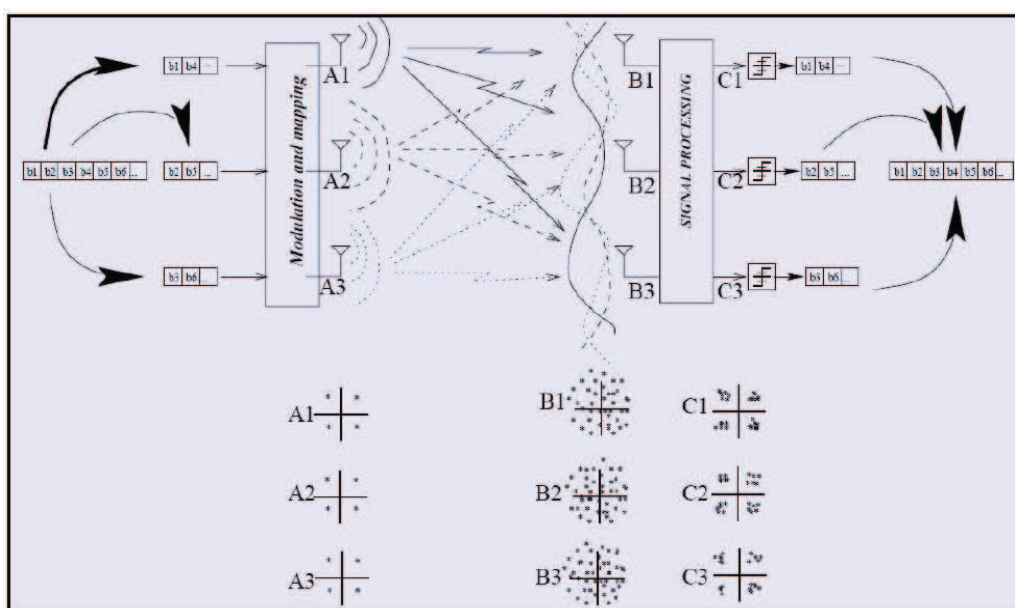


Figura 2.43. Multiplexación Espacial ^[31]

2.5.5.3.3 *Beamforming*

Beamforming es una técnica de procesamiento de señales usada para controlar el patrón de radiación de una antena; es aplicada tanto en transmisión como en recepción. El *beamforming* en transmisión permite aumentar la directividad de la antena en una determinada dirección y minimizar la ganancia de la antena para las demás direcciones; en tanto que en recepción el *beamforming* se utiliza para incrementar o disminuir la sensibilidad del receptor en determinada dirección, es decir se puede aumentar la sensibilidad en la dirección de la señal deseada y reducirla en las demás direcciones, con esto se logra reducir la interferencia y el ruido.

2.5.5.4 *Funcionamiento de MIMO*

La idea principal en la que se basa *MIMO* es la explotación de la propagación multicamino, ya que gracias a ella es posible multiplicar la capacidad de los sistemas inalámbricos.

Un sistema *MIMO* dispondrá de un transmisor con N_T antenas transmisoras espacialmente distribuidas. El transmisor constará de un *DSP* (*Digital Signal Processor*) que codificará un flujo de datos de un solo usuario con velocidad R , en N_T “subflujos” de velocidad R/N_T cada uno. Cada subflujo será modulado y enviado en paralelo hacia el canal inalámbrico por una antena diferente. Todos los subflujos se envían en el mismo intervalo de tiempo y a la misma frecuencia por antenas diferentes. Dicho de otra manera, se enviarán múltiples señales simultáneamente por el mismo radiocanal.

MIMO saca ventaja del multicamino de la siguiente forma:

- Cada ruta será tratada como un canal diferente, creando un cable virtual sobre el cual se transmite la señal. El canal inalámbrico contendrá un conjunto de cables virtuales. Esto ocasionará que las señales transmitidas se mezclen juntas.

- Al emplear múltiples antenas separadas espacialmente, se puede aprovechar de los cables virtuales para transmitir más datos, multiplicando de esta manera el *throughput*.
- La tasa máxima por canal crecerá linealmente con el número de subflujos de datos diferentes que son transmitidos en el mismo canal.
- Debido a la diversidad de antenas, se incrementará también la distancia de cobertura.

Finalmente cada una de las N_R antenas del receptor recibirá una señal, fruto de la combinación de los múltiples subflujos transmitidos. El *DSP* del receptor, mediante complejos algoritmos de procesamiento de señales, separará cada uno de ellos, los ordenará y los combinará, recuperando así la señal original con los datos transmitidos originalmente.

Con un esquema de transmisión *MIMO* se consigue un incremento lineal en la eficiencia espectral. En consecuencia, la distancia, el *BER*, la capacidad y la tasa de bits se verán mejoradas notablemente.

2.5.5.5 *MIMO EN LTE* ^{[4], [24]}

MIMO usa las palabras *input* y *output* para hacer referencia al canal radio (medio de transmisión, antenas, cableado y circuitos analógicos conectados a las antenas) y no a los transmisores y receptores. *LTE* utiliza la técnica *SFBC* (*Space Frequency Block Coding*) la cual se basa en el principio de *Alamouti*, en donde los datos se copian en distintas frecuencias en lugar de bloques de tiempo.

Para incrementar la eficiencia espectral, *MIMO* se basa en multiplexación espacial, en la cual varios flujos de datos de distintos usuarios son transmitidos simultáneamente. Los términos *MIMO* y multiplexación espacial generalmente se usan como sinónimos.

2.5.5.5.1 Terminología para múltiples antenas en LTE

- a) *Codeword (CW); datos de usuario*: Representan los datos de un usuario antes de que sean modificados para su transmisión. Se pueden usar uno o dos *CWs*, (*CW0* y *CW1*) dependiendo de las condiciones del canal.
- b) *Layer, stream*: Es sinónimo de flujo. En multiplexación espacial al menos dos *layers* deben ser usadas. En *LTE* se permiten hasta cuatro *layers*. El número de *layers* es siempre menor o igual que el número de antenas.
- c) *Precoding*: La precodificación modifica los flujos de datos antes de la transmisión. Esto puede ser hecho por diversidad o multiplexación espacial.

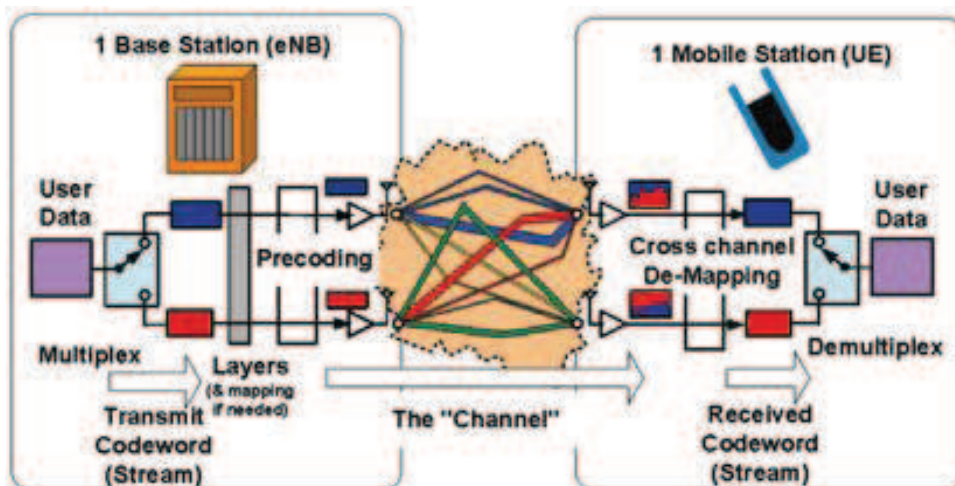
2.5.5.5.2 SU-MIMO Y MU-MIMO en el downlink de LTE

En *SU-MIMO*, dos *CWs* son enviados a un único *UE*. En tanto que en *MU-MIMO* cada *CW* es enviado solamente a un *UE*.

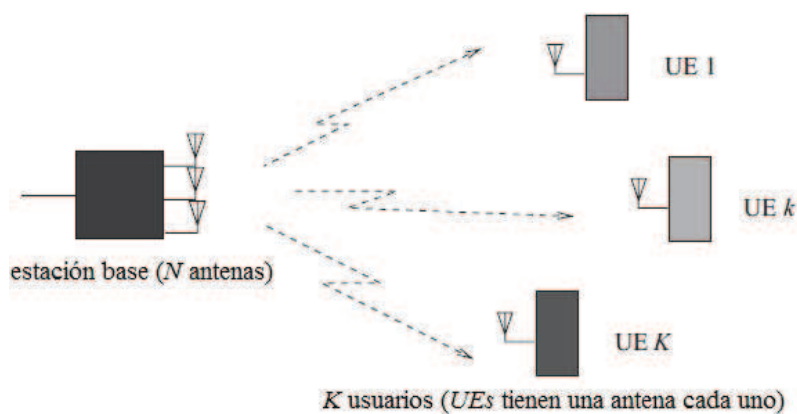
La Figura 2.44, (a) muestra el funcionamiento de *SU-MIMO* y (b) de *MU-MIMO*. En la opción (a) se puede apreciar el uso de dos *codewords* para un único usuario (*UE*). En la opción (b) se muestra un escenario de *MU-MIMO DL* en el que la estación base transmite simultáneamente a K *UEs*.

2.5.5.5.3 Modos de operación o transmisión de MIMO en el downlink de LTE

Los factores fundamentales de los que depende el rendimiento de *MIMO* son: el estado del canal inalámbrico, la calidad de la señal, la velocidad del terminal móvil y la correlación de las señales recibidas en las antenas del receptor. Por lo tanto dependiendo de la situación se usará cierto modo. En *LTE* se definen siete modos de operación para *MIMO* en el enlace descendente, éstos son:



(a) SU-MIMO



(b) MU-MIMO

Figura 2.44. Esquemas MIMO en el DL. ^[4]

- a) *Modo 1- Puerto de antena simple; Puerto 0:* Es usado en sistemas inalámbricos comunes donde un flujo de datos es transmitido hacia una antena y recibido por otra (SISO: *Single Input Single Output*) o más antenas (SIMO: *Single Input Multiple Output*, diversidad de recepción).
- b) *Modo 2- Diversidad de Transmisión:* este modo de operación implica que la transmisión del mismo flujo de información se realiza a través de múltiples antenas (LTE es compatible con la opción de dos o cuatro antenas). El flujo de información se codifica de manera diferente en cada una de las antenas utilizando los llamados SFBC (*Space-Frequency Block Codes*). A diferencia de Alamouti, donde los símbolos de datos se repiten en el tiempo, SFBC

repite los símbolos de datos sobre diferentes subportadoras en cada antena.

Este modo es usado en *LTE* por defecto para los *common channels* así como para los canales de control y *broadcast*. Debido a que es una transmisión simple, no se mejora la tasa máxima de transmisión pero la calidad de la señal si mejora notablemente debido a que la *SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio)* baja, lo que permite decodificar la señal.

- c) *Modo 3- Multiplexación Espacial de Lazo abierto (OL-SM Open Loop Spatial Multiplexing)*: En este caso dos flujos de información (dos palabras código) son transmitidas sobre dos o más antenas (hasta 4 en *LTE*). No hay retroalimentación explícita del equipo de usuario, a pesar de ello un *TRI (Transmit Rank Indication)* es transmitido por el *UE* y es usado por la estación base para seleccionar el número de capas espaciales.

Como se transmiten varias palabras código, *OL-SM* proporciona un rendimiento mucho mejor en el *throughput* que la diversidad de transmisión. También es más simple de implementar y es considerado uno de los tipos de *MIMO* más importantes que puede ser usado en los sistemas *LTE*.

- d) *Modo 4- Multiplexación Espacial de Lazo Cerrado (CL-SM Close Loop Spatial Multiplexing)*: Es similar a *OL-SM*, dos flujos de información son transmitidos sobre dos palabras código de *N* antenas (hasta 4). La diferencia es el uso de un *PMI (Pre-coding Matrix Indicator)* que realimenta el móvil con la estación base. Este mecanismo de retroalimentación permite que el transmisor pre-codifique los datos para optimizar la transmisión sobre el canal inalámbrico, debido a ello las señales en el receptor podrán ser separadas fácilmente en los flujos originales. Este tipo de *MIMO* se espera que sea el de más alto rendimiento en *LTE*.

- e) *Modo 5.- Multi-Usuario MIMO*: Este modo es similar a *CL-SM*, pero el flujo de información está dirigida a diferentes terminales. Por lo tanto, múltiples usuarios comparten los recursos. Por un lado cada usuario experimenta la misma velocidad de datos y por otro la red de datos mejora

considerablemente. Se espera que los arreglos lineales de antenas que se utilicen para este tipo de *MIMO* en la práctica superen a la distribución espacial de múltiples antenas.

El número de usuarios está limitado por el número de capas espaciales: el límite es un usuario por capa espacial. Los usuarios son separados en el dominio del espacio y pueden ser correlacionados debido a los patrones individuales de conformación de haz. En caso de que las capas no sean completamente ortogonales, cada usuario experimentará interferencia de los otros usuarios. Este modo es muy adecuado cuando las redes *LTE* sufren de sobrecarga.

- f) *Modo 6- Lazo cerrado de grado 1 con pre-codificación:* Éste caso representa el escenario donde una palabra código es transmitida a través de una capa espacial única. Muchos consideran este caso como un escenario de retroceso de *CL-SM* asociado con la conformación de haz.
- g) *Modo 7- Puerto de antena única:* Éste es un tipo de conformación de haz donde una palabra código es transmitida sobre una sola capa. Se añaden señales de referencia dedicadas, lo que implica un puerto de antena adicional y la transmisión de más de 4 antenas.

El terminal calcula la calidad del canal por medio de las señales de referencia comunes a las 4 antenas. Se esperan usar arreglos lineales de antenas para este modo.

2.5.5.5.4 *SU-MIMO* Y *MU-MIMO* en el *uplink* de *LTE*

a) *SU-MIMO*

Para implementar *SU-MIMO* en el *UL* se requieren de dos transmisores. Esto es un gran reto en términos de costo, tamaño y consumo de batería y, por estas razones *SU-MIMO* actualmente no es una prioridad para su desarrollo. También el incremento en las velocidades de transmisión no es tan significativo e importante como si lo es en el *DL*. Además si el sistema

fuese implementado, sería impráctico aumentar la potencia de transmisión del *UE* lo suficientemente como para alcanzar la *SNR* requerida por los receptores del *eNB*.

b) *MU-MIMO*

MU-MIMO puede ser implementado usando dos transmisores pertenecientes a diferentes usuarios, tal como lo muestra la Figura 2.45.

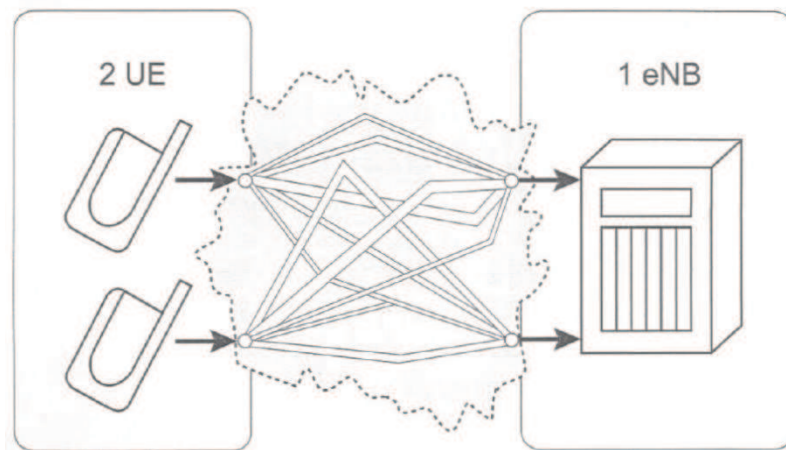


Figura 2.45. *MU-MIMO UL*. ^[4]

El hecho de que los transmisores estén separados físicamente tiene dos consecuencias. La primera es que no hay precodificación debido a que la fuente de los datos no puede ser compartida entre los dos *UEs* para crear una mezcla del flujo de datos. Segundo, la separación de los transmisores incrementa la probabilidad de que los canales radio vistos por el *eNB* no estén correlacionados.

MU-MIMO implica la transmisión simultánea de *codewords* de diferentes *UEs* en el mismo instante y frecuencia en varias *layers*.

2.6 ASPECTOS PRÁCTICOS DE IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED 4G *LTE* ^{[1], [33]-[35], [16]}

Para poder realizar la implementación de una red de telefonía móvil celular de banda ancha 4G *LTE*, hay que formular un plan de negocios.

Un plan de negocios consta de tres componentes principales:

- El plan de mercado;
- el plan de ingeniería y
- el plan financiero.

La Figura 2.46 muestra un mapa conceptual de los elementos que intervienen en un plan de negocios para el despliegue de una red celular:

2.6.1 PLAN DE MERCADO

El plan de mercado es esencial para poder definir la oferta del producto y su aceptación por el mercado. La investigación de mercado debe ser hecha por profesionales especializados. Dentro de este plan debe constar el análisis de varios factores como son:

- Una evaluación socioeconómica de la región donde se pretende implementar *LTE*, lo que implica un estudio de la ubicación geográfica, un análisis de la población y también de la economía de la región en cuestión.
- Un estudio de la situación actual del mercado de la telefonía móvil así como la proyección de ésta en unos cuantos años.
- Un estudio acerca del comportamiento del consumidor frente al uso de nuevas tecnologías así como también la competencia y oferta del mercado, lo que llevará a definir cuál es el mercado potencial.

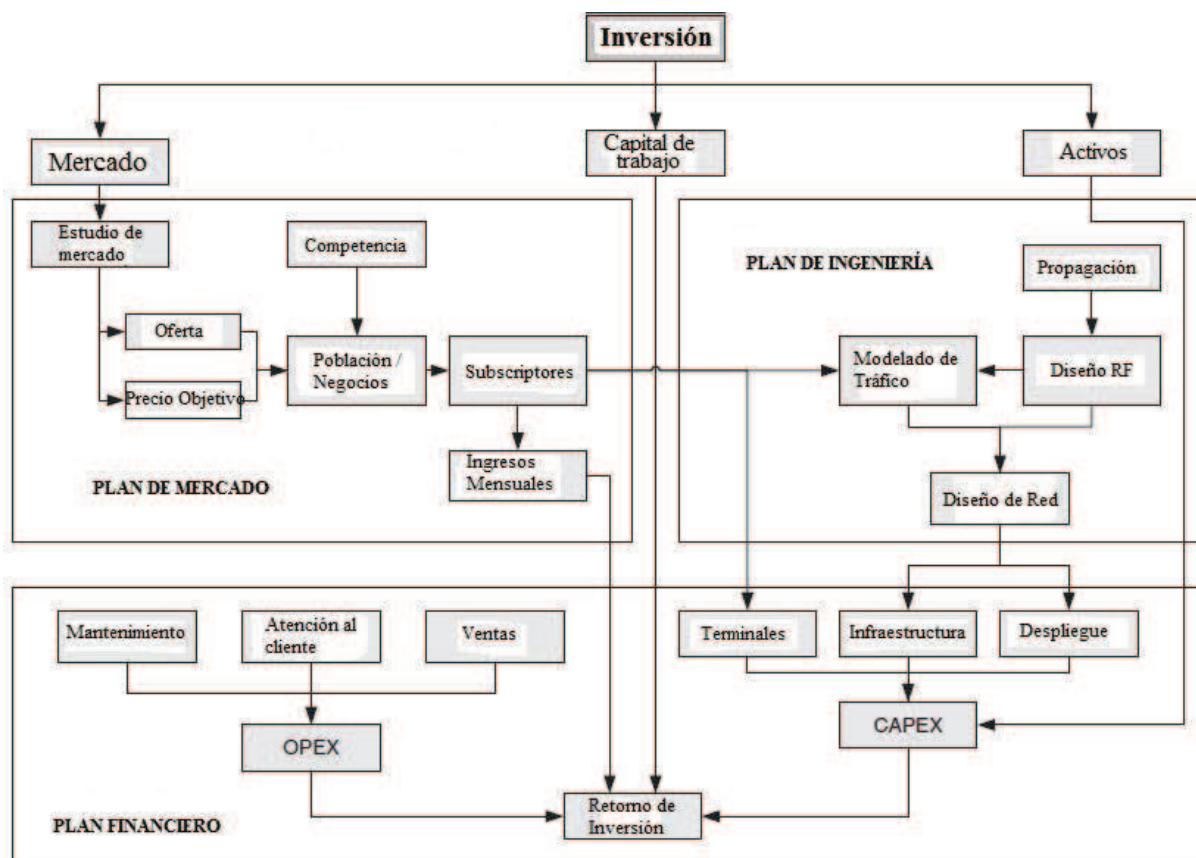


Figura 2.46. Plan de Negocios. ^[1]

2.6.2 PLAN DE INGENIERÍA

El plan de ingeniería se basa en el plan de mercado para definir su diseño y de esta manera cumplir con las condiciones impuestas por este plan. Bajo esta premisa lo que se estima es el número de celdas requeridas para la implementación de la red, en consecuencia hay muchos factores que afectan al tamaño de una celda, estos factores son: la propagación de señales de *RF* que dependen del ambiente en el que se propagan; la ubicación de dónde se proveerá el servicio; la disponibilidad del espectro; la interferencia; los equipos a ser usados y la cantidad de tráfico a ser soportado.

Estos factores interactúan el uno con el otro y no pueden ser tratados separadamente. Como ejemplo, si el tráfico a ser transportado es alto se

necesitan de mejores esquemas de modulación, que la señal sea más robusta y que no exista tanta interferencia. Generalmente se debe especificar un rango adecuado de operación.

Dentro de los puntos a destacar cuando se realiza un diseño de *LTE* enmarcado en un plan de ingeniería se pueden mencionar los siguientes:

- Diseño de la red de acceso en la zona geográfica elegida
- Diseño de la red de core de *LTE*
- Diseño de la red de transporte

Para el diseño de la red de core de *LTE* es fundamental conocer a los proveedores de *EPC*. Los componentes fundamentales del *EPC* son básicamente el *SG-W*, *P-GW* y el *MME*. Los *SG-W* y *P-GW* pueden ser implementados como *routers* de borde y para la implementación del *MME* se utilizan plataformas *ATCA* (*Advanced Telecommunications Architecture*), pero eso ya depende de cada proveedor. Dependiendo del proveedor que se contrate, éste puede ofrecer una solución desde el acceso radio, pasando por el *EPC*, el *backbone* de transporte hasta la entrega de servicios. Los proveedores también ofrecen interoperabilidad de *LTE* con redes de versiones previas y actuales.

Para el diseño de la red de acceso los pasos a seguir son:

- Definir la banda de frecuencia de operación o espectro a usar, que en primera instancia depende del marco regulatorio del país en cuestión, por otro lado sería conveniente usar las mismas bandas ya asignadas anteriormente a los operadores.
- Analizar los modelos de propagación que se pueden usar, desde el punto de vista de la tecnología *LTE* son factibles los modelos *COST-231* u *OKUMURA-HATA*, pero en definitiva el modelo de propagación va a depender de dónde se va a implementar la red.

- Establecer la cobertura que proporcionará la red. Para ello hay que basarse en el modelo de propagación escogido, los valores de pérdidas calculados permitirán definir la distancia de cobertura de la celda en cuestión. Para realizar el cálculo de la cobertura se necesitan datos de los transmisores usados en el *eNB* así como también datos del *UE*.
- Determinar la capacidad y número de *eNodeBs*.
- Definir la topología de la red de acceso. Teniendo en cuenta todo lo anterior ya es posible establecer dónde irán ubicados los *eNBs*.
- Decidir los equipos que se utilizarán para el despliegue de la red de acceso.

En cuanto a la red de transporte *LTE* requiere de medios que soporten altas tasas de transmisión, por lo que la fibra óptica sería un medio adecuado de transmisión, aunque también existe la posibilidad de interconectar los *eNBs* mediante microondas de gran capacidad.

Adicionalmente se debe tener en cuenta la infraestructura extra que se requiere. Las estaciones base deben contar con Subsistemas de protección, energía, un adecuado sistema de puesta a tierra, un pararrayos, banco de baterías de respaldo, breakers y el uso de torres auto-soportadas. El diseño del plan de ingeniería debe ser realizado usando una herramienta de planificación profesional.

En la Figura 2.47 se presenta una solución propuesta por *ALCATEL-LUCENT*, en donde se puede apreciar el tipo de hardware que el proveedor ofrece en cada parte de la red *LTE*. Se ha escogido a este proveedor porque presenta una solución completa y esquemáticamente su representación ayuda mucho para entender los elementos que intervienen.

La red de acceso *E-UTRAN* está formada por *eNBs 9412*. En el *core* de *LTE* la entidad de red *S-GW* y *P-GW* utilizan *Gateways 7750 SR*, por su parte el *MME* lo

conforma un servidor *ATCA 9471 MME* y el *PCRF* un servidor *ATCA 5750*. El dispositivo que trabaja en la plataforma de servicios *IMS* es el *ATCA CSCF 5450 ISC* y en la entidad *HSS*, un servidor *ATCA 8650 SDM*. Finalmente se muestran los equipos que se utilizan para interconectar la *E-UTRAN* con la *EPC*. En este escenario se distinguen dos partes, la primera consiste en un bloque de dispositivos usados para la movilidad y la segunda consiste en los dispositivos usados para la red de transporte.

2.6.3 PLAN FINANCIERO

El plan financiero analiza la posibilidad de un riesgo financiero. Hoy en día hay paquetes de software especializado que permiten generar un plan financiero de acuerdo a la tecnología. Hay que tener en cuenta que este plan se desarrolla después o a la par con el plan de mercado y el plan de ingeniería.

Los términos usados en este plan son:

- *CAPEX (Capital Expenditure)*.- Es la inversión de capital que se realiza por año. Los puntos a considerar son: adquisición de espectro, lugares de construcción e implementación, infraestructura (baterías, aire acondicionado, etc), equipo de la estación base, equipo de *core* y equipo de *backhaul*.
- *OPEX (Operational Expenditure)*.- Corresponde a gastos operacionales como rentas, arrendamientos, operación y mantenimiento. Más detalladamente se pueden mencionar los siguientes puntos: costos de renta de lugares, costos por mantenimiento de *backhaul*, costos de acceso a *Internet*; costos de interconexión con la telefonía fija, costos de instalación de *CPE*, costos de terminación *VoIP*, costos de facturación, costos de atención al cliente, costos del equipo de ingeniería, costos de *marketing*, costos por comisión de ventas, costos promocionales, costos de financiamiento, personal de administración, costos indirectos.

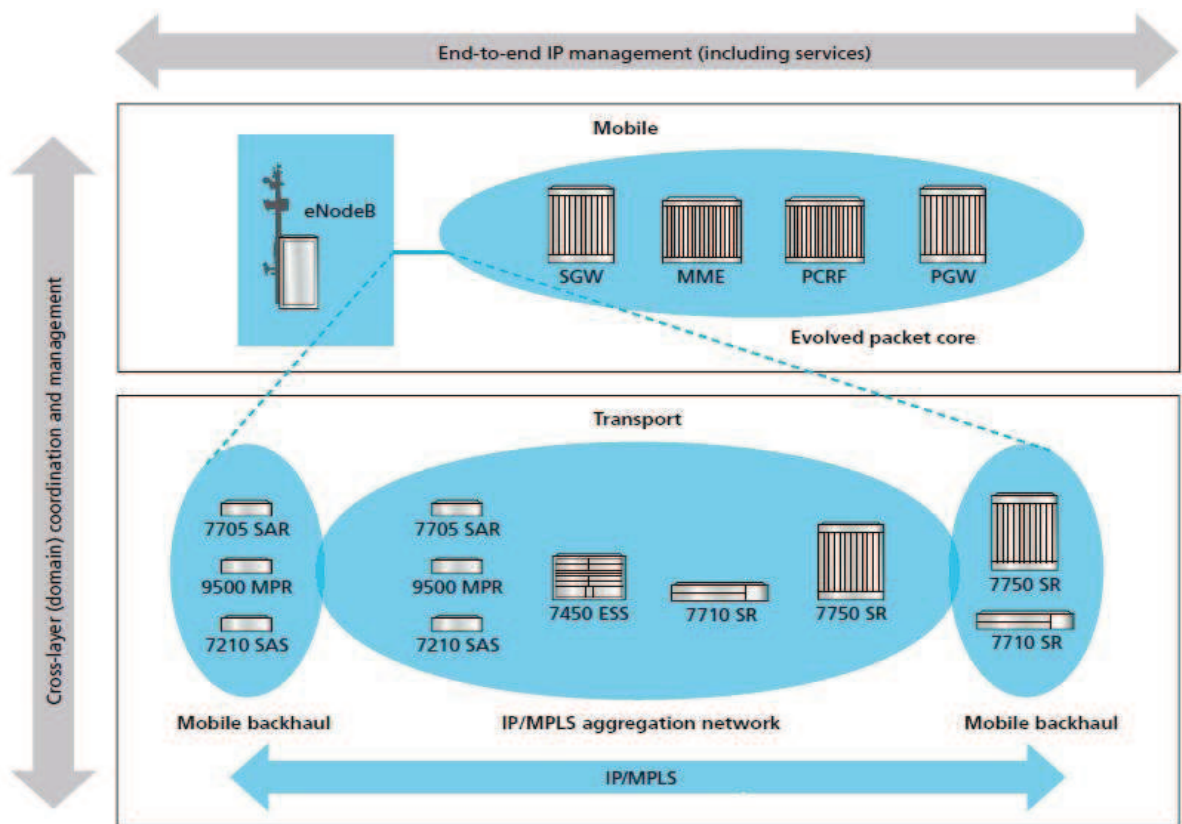
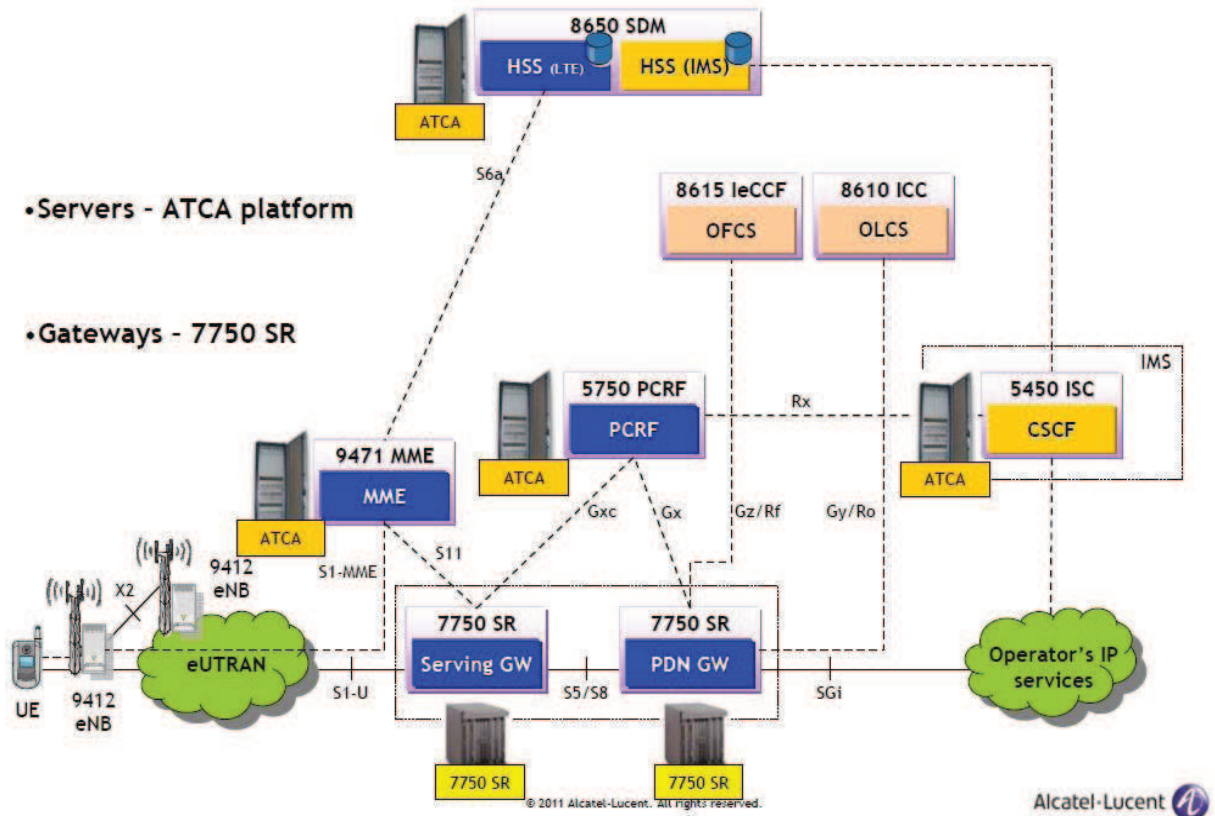


Figura 2.47. Propuesta completa presentada por Alcatel-Lucent para el despliegue de una red LTE. [33], [34]

2.6.4 HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

Actualmente existen poderosas herramientas computacionales a nivel de software que permiten realizar una predicción del comportamiento de la futura red inalámbrica a implementarse. A nivel de ingeniería estos programas permiten obtener resultados de redes de comunicaciones completas, analizando cada etapa del diseño. Cabe mencionar que también existe software especializado para el plan de mercado y financiero.

Como ejemplo, para la simulación de redes celulares y en especial para redes *LTE* se puede mencionar a *SIRENET* que es un programa que facilita la planificación y gestión de redes radio; *QualNet* que es un software que ayuda al modelado de redes cableadas e inalámbricas; *CelPlan*; etc y a nivel financiero y de mercado se puede mencionar a *WiROI*, etc. Como se puede apreciar hay varias opciones, depende entonces del operador con qué herramienta desea trabajar. La Figura 2.48 muestra las herramientas de simulación que se pueden encontrar en el mercado de telefonía móvil.



Figura 2.48. Herramientas de predicción y planeación para telefonía móvil.

REFERENCIAS DEL CAPÍTULO 2

- [1] KOROWAJCZUK, Leonhard. *LTE, WIMAX and WLAN Network Design, Optimization and Performance Analysis*. Editorial WILEY. 2011.
- [2] SESIA, Stefania; TOUFIK, Issam; BAKER, Matthew. *LTE – The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice*. Editorial WILEY. Segunda Edición. 2011.
- [3] AGUSTI, Ramos; BERNARDO, Francisco; CASADEVALL, Fernando; FERRÚS, Ramon; PÉREZ, Jordi; SALLEN, Oriol. *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles*. Editorial Fundación Vodafone España. 2010.
- [4] RUMNEY, Moray. *LTE and the Evolution to 4G Wireless*. Editorial WILEY. 2009.
- [5] Dahlman, Erik; Parkvall, Stefan; Sköld, Johan; Beming, Per. *3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband*. Editorial ELSEVIER. 2007.
- [6] Dahlman, Erik; Parkvall, Stefan; Sköld, Johan. *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Editorial ELSEVIER. 2011.
- [7] ERGEN, Mustafa. *Mobile Broadband Including WiMAX and LTE*. Editorial Springer. 2009.
- [8] KHAN, Farooq. *LTE for 4G Mobile Broadband Air Interface Technologies and Performance*. Editorial CAMBRIDGE. 2009.
- [9] HOLMA Harri; TOSKALA Antti. *LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*. Editorial WILEY. 2009.
- [10] MUÑOZ , Karina. *Análisis de la Tecnología LONG TERM EVOLUTION (LTE) para su posible implementación en el Ecuador*. Ecuador 2011.

- [11] HURTADO, Christian. *Estudio de factibilidad para la implementación de LTE (LONG TERM EVOLUTION) en el Ecuador*. Ecuador 2011.
- [12] MAJEED Haris; UMAR Rahim; ALI BASIT Arslan. *Smart Antennas – MIMO, OFDM & Single Carrier FDMA for LTE*. Linnaeus University. 2011.
- [13] OROZCO, Nathaly. *Estudio de factibilidad para la migración del sistema móvil UMTS/HSPA a LTE*. Ecuador 2011.
- [14] RESTREPO, Jose. *Análisis y estudio técnico de la transferencia de tecnología para la prestación de servicios de telefonía y banda ancha móvil en Colombia a través de operadores móviles virtuales soportados por tecnología LTE*. Colombia 2011.
- [15] SOTO, Katherine. *LTE, evolución a largo plazo para el acceso inalámbrico de banda ancha móvil*. Chile 2009.
- [16] WONG MATOS, Christopher. *Análisis y diseño de una red 3GPP LTE en el departamento de Cusco*. Perú 2011.
- [17] SÁNCHEZ, Juan. *Analysis of SC-FDMA and OFDMA Performance over Fading Channels*. España 2011.
- [18] CALLE, Darwin. *Análisis del estándar IMS 3GPP orientado a la interconexión de redes fijas y móviles en conjunto con las redes de nueva generación NGN TISPAN/ETSI*. Ecuador 2008.
- [19] BERNAL, Iván. *IMS*. Ecuador 2009.
- [20] 3GPP LTE - Evolved UTRA - Radio Interface Concepts
<http://ecee.colorado.edu/~ecen4242/LTE/radio.htm>
- [21] Video SC-FDMA vs. OFDMA - SixtySec
[http://www.youtube.com/watch?feature=endscreen&v=dr4YQAfifKA&NR=](http://www.youtube.com/watch?feature=endscreen&v=dr4YQAfifKA&NR=1)

- [22] Video From OFDM to OFDMA - SixtySec
<http://www.youtube.com/watch?v=QEpxtiN8Trc&feature=relmfu>
- [23] SC-FDMA Single Carrier FDMA in LTE
http://www.ixiacom.com/pdfs/library/white_papers/SC-FDMA-INDD.pdf
- [24] The seven modes of mimo in LTE.
<http://www.tsiwireless.com/docs/whitepapers/The%20Seven%20Modes%20of%20MIMO%20in%20LTE.PDF>
- [25] LTE MIMO CONCEPTS
<http://4gwirelessjobs.com/articles/article-detail.php?LTE-MIMO-Concepts&Arid=MTQz&Auid=OTY=>
- [26] MIMO en WIMAX y LTE
<http://www.gradiant.org/es/actualidad/noticias/289-mimo-en-wimax-y-lte.html>
- [27] MIMO en WIKIPEDIA ESPAÑOL
<http://es.wikipedia.org/wiki/MIMO>
- [28] MIMO Technologies in 3GPP LTE and LTE-Advanced
<http://downloads.hindawi.com/journals/wcn/2009/302092.pdf>
- [29] Video explicativo MIMO
http://wikitel.info/wiki/Antenas_inteligentes
- [30] A primer on MIMO in LTE
http://www2.electronicproducts.com/A_primer_on_MIMO_in_LTE-article-farc_agilent_feb2010-html.aspx
- [31] ANGUÍS, José. *Redes de Área Local Inalámbrica: Diseño de la WLAN de Wheelers Lane Technology College*. España 2008.

- [32] SANGUCHO, Iván. *Estudio de Tecnología MIMO y su aplicación en las Telecomunicaciones*. Ecuador 2009.
- [33] VELARDE, Edgar. *Alcatel-Lucent LTE Solution*. Mayo 2011.
- [34] Alcatel-Lucent. *Alcatel-Lucent Evolved Packet Core Solution: Delivering technical innovation for the new LTE mobile core*.
- [35] MANOSALVAS, Henry; SANTAMARÍA, Adriana. *Estudio, diseño y simulación de una red LTE (Long Term Evolution) para telefonía móvil en los Valles de Tumbaco y los Chillos utilizando software predictivo*. Ecuador 2012.
- [36] MONTEALEGRE Fabián; SALAS Marcelo; ACUÑA Pablo; SALAZAR José Pablo. *Propuesta de requerimientos técnicos para la implementación de redes móviles con la tecnología "Long Term Evolution (LTE)" en Costa Rica*. 2009.

CAPÍTULO 3

LTE ADVANCED

El presente capítulo se centra en el estudio de *LTE-Advanced* como una tecnología 4G especificada en la versión 10 del 3GPP superior a *LTE*, para lo cual se presenta: una pequeña introducción basada en el proceso de estandarización de esta tecnología, un estudio de las nuevas bandas de frecuencia asignadas, la arquitectura del sistema y métodos de acceso; y, un estudio de las características más relevantes e importantes adicionadas a la versión anterior.

La implementación de *LTE-Advanced* añadirá características significativas a *LTE* versión 8 lo que permitirá cumplir con los requisitos establecidos por el *IMT-Advanced* para un verdadero estándar 4G.

3.1 INTRODUCCIÓN ^[1]

En el 2008 la *ITU* asignó el término *IMT-Advanced* para identificar sistemas con capacidad superior a las tecnologías del *IMT-2000*. *LTE-Advanced (LTE-A)* es la versión evolucionada de *LTE* cuyo objetivo es exceder los requisitos impuestos por el estándar *IMT-Advanced*. En octubre del 2009 el 3GPP envió a la *ITU-R* todas las especificaciones de *LTE-A* para que sean verificadas y evaluadas y de esta manera conseguir que *LTE-A* sea una tecnología candidata 4G *IMT-Advanced*.

LTE-A busca mejoras en tres áreas: velocidades de transmisión de datos pico y promedio; eficiencia espectral y latencia en el plano de usuario y de control.

Dentro de los requisitos globales que el *IMT-Advanced* exige a las tecnologías que quieren ser 4G se pueden mencionar:

- Funcionalidad a nivel mundial manteniendo al mismo tiempo la flexibilidad necesaria para soportar una amplia gama de servicios y aplicaciones.

- Compatibilidad de servicios dentro del *IMT* y redes fijas.
- Capacidad de interconexión con otros sistemas de acceso radio.
- Alta calidad de servicios móviles, equipo de usuario factible de ser usado a nivel mundial, aplicaciones de usuario y servicios amigables, capacidad de *roaming* a nivel mundial.
- Velocidades de transmisión pico mejoradas para el soporte de servicios avanzados y aplicaciones. El objetivo en velocidad es de 100 Mbps para una gran movilidad y de 1 Gbps para baja movilidad en el *DL*.

A continuación se presenta una tabla resumida que muestra los requisitos de acceso radio establecidos por la *ITU-R* para *IMT-Advanced* en varios escenarios.

Parámetro	Downlink	Uplink
Ancho de banda	40 MHz	
Eficiencia espectral pico (bps/Hz)	15	6.75
Eficiencia espectral promedio (bps/Hz/celda)	3 (<i>hotspot</i> en el interior) 2.6 (Micro urbano) 2.2 (Macro urbano) 1.1 (Macro rural)	2.25 (<i>hotspot</i> en el interior) 1.8 (Micro urbano) 1.4 (Macro urbano) 0.7 (Macro rural)
Eficiencia espectral por usuario en el borde de la celda (bps/Hz)	0.1 (<i>hotspot</i> en el interior) 0.075 (Micro urbano) 0.06 (Macro urbano) 0.04 (Macro rural)	0.07 (<i>hotspot</i> en el interior) 0.05 (Micro urbano) 0.03 (Macro urbano) 0.015 (Macro rural)
Capacidad de VoIP (usuario/celda/MHz)	50 (<i>hotspot</i> en el interior) / 40 (Micro urbano y Macro urbano) / 30 (Macro rural)	
Latencia en el plano de usuario (ms)	10	
Latencia en el plano de control (ms)	100	

Tabla 3.1. Requisitos *IMT-Advanced* para tecnologías 4G ^[1].

En respuesta a estos requerimientos *LTE-A* propone:

Parámetro	Downlink	Uplink
Ancho de banda	Hasta 100 MHz	
Velocidad de transmisión pico (Mbps)	1000	500
Eficiencia espectral pico (bps/Hz)	30	15
Eficiencia espectral promedio (bps/Hz/celda)	2.6 (hotspot en el interior)	2 (hotspot en el interior)
Eficiencia espectral por usuario en el borde de la celda (bps/Hz)	0.09 (hotspot en el interior)	0.07 (hotspot en el interior)
Capacidad de VoIP (usuario/celda/MHz)	Superior a la versión 8 de <i>LTE</i>	
Latencia en el plano de usuario (ms)	10	
Latencia en el plano de control (ms)	50 (De <i>Idle</i> a Activo) 10 (De Inactivo a Activo)	

Tabla 3.2. Propuesta del 3GPP para que *LTE-Advanced* sea considerada una tecnología 4G^[1].

Los objetivos de *LTE-A* están enfocados en mantener compatibilidad con versiones previas a ésta. Esto permite a los operadores de red continuar sirviendo a sus clientes *LTE* mientras su equipo de red es actualizado progresivamente. Estos objetivos fueron establecidos independientemente de los requerimientos propuestos por el *IMT-Advanced*, y por tal motivo varios de ellos han superado los límites establecidos, como por ejemplo, la eficiencia espectral y la latencia en el plano de usuario y de control.

La propuesta del 3GPP de *LTE-Advanced* para la *ITU-R* a más de los detalles correspondientes a las características de la tecnología, análisis de balance de potencia e información acerca de servicios soportados, espectro y rendimiento técnico, incluye los detalles de la tecnología de interfaz radio para componentes *TDD* y *FDD*.

La evaluación de *LTE-A* fue llevada a cabo por 18 compañías del 3GPP, mostrando que *LTE-A* satisface los parámetros establecidos por el *IMT-Advanced*. Como resultado de aquello *LTE-Advanced* fue aceptado por la *ITU* como tecnología *IMT-Advanced* en octubre del 2010.

3.1.1 DOCUMENTOS 3GPP PARA LTE-ADVANCED ^[7]

El 3GPP publica todos los documentos relacionados con el desarrollo de LTE-A. Estos documentos son libres y de acceso público y pueden ser descargados de la página web del 3GPP (<http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36-series.htm>). Dentro de los documentos ya publicados a manera de ejemplo se mencionan los siguientes en la Tabla 3.3. Cabe recalcar que estos documentos son actualizados constantemente dependiendo del progreso que tenga el desarrollo de la tecnología.

Descripción de los objetivos globales de LTE-Advanced.	Ítem de estudio RP-0599
Requisitos basados en los requerimientos de la ITU para sistemas 4G.	Requirements TR 36.913 v9.0.0 (2009-12)
Resumen del trabajo desarrollado en la etapa 1.	Study Phase Technical Report TR 36.912 v9.3.0 (2010-06)
Resumen de la etapa 2 para el desarrollo de la capa física.	Physical Layer Aspects TR 36.814 v9.0.0 (2010-03)
Estudio de la transmisión de múltiples antenas	Study phase Technical Report on E-UTRA UE Radio Transmission and Reception TR 36.807
Las especificaciones técnicas de la etapa 3 comienzan a aparecer en el Release 10 36-series. Documentos de fecha 2010-09.	

Tabla 3.3. Documentos 3GPP para LTE-Advanced ^[7].

3.1.2 BANDAS DE FRECUENCIA EN LTE-ADVANCED ^{[1], [7], [13]}

Para mejorar el rendimiento de LTE existen dos formas de hacerlo, la primera es usando más espectro radioeléctrico y la segunda es usando el espectro disponible más eficientemente. La ITU tomó esto en consideración y por lo tanto en la WRC 2007 (World Radiocommunication Conference) se establecieron nuevas bandas de frecuencia destinadas para servicios móviles.

Las nuevas bandas de frecuencia que se añaden a la versión 8 de LTE son:

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

Todas las bandas nuevas identificadas por la *WRC 2007* son bandas para cualquier tipo de tecnología *IMT*, es decir no son específicas del *IMT-2000* o *IMT-Advanced*. En la siguiente figura se puede apreciar las nuevas bandas establecidas por la *WRC-2007*.

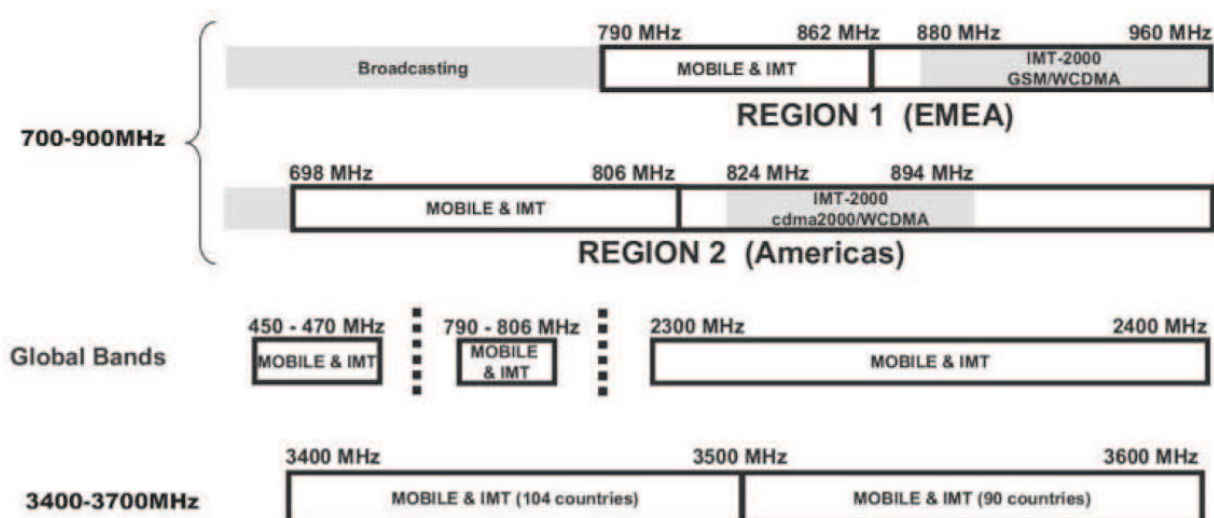


Figura 3.1. Asignación de nuevo espectro de acuerdo a la *WRC-2007* ^[1].

LTE-A está diseñado para operar en asignaciones de espectro de diferentes tamaños, incluyendo asignaciones de más de 20MHz. Recuérdese que en *LTE* versión 8 el ancho de banda de 20 MHz era el tope. A pesar de ello es deseable disponer de anchos de banda superiores a los 20 MHz pero en espectro adyacente, la limitada disponibilidad de espectro implica la agregación de bandas diferentes para conseguir el ancho de banda requerido. Esta última opción es la permitida de acuerdo a las especificaciones del *IMT-Advanced*.

3.1.3 ARQUITECTURA DE *LTE-ADVANCED*

En base a lo establecido al inicio del presente capítulo, la arquitectura de *LTE-Advanced* es la misma que la presentada en el capítulo 2, sección 2.3, referente a la arquitectura de *LTE*, salvo por una arquitectura adicional implementada en la red de acceso, esta nueva arquitectura tiene que ver con el uso de *relay nodes* cuyo funcionamiento se explica con más profundidad en la en la sección 3.5 del presente capítulo. Por ahora solo es conveniente mencionarlos como elementos integradores de la arquitectura general de *LTE-Advanced*.

Los bloques funcionales que integran la arquitectura general del sistema son: la *E-UTRAN*, la *EPC*, la plataforma de servicios *IMS* y el equipo de usuario. Dentro de cada bloque, las entidades de red y las interfaces que unen los distintos elementos en las diferentes redes de acceso, de *core* y externas son las mismas que las utilizadas en *LTE*.

En *E-UTRAN* el elemento principal es el *eNB*, éste se comunica con otros *eNBs* a través de la interfaz *X2* y con la *EPC* por la interfaz *S1-U* del plano de usuario y la interfaz *S1-MME* del plano de control. La *EPC* la integran tres entidades de red, éstas son: *MME*, *S-GW* y *P-GW*. La interfaz de comunicación entre la entidad *MME* y la entidad *S-GW* es la interfaz *S11*, entre la entidad *S-GW* y la entidad *P-GW* es la interfaz *S5/S8* y entre *MMEs* es la interfaz *S10*. Finalmente la interfaz que se utiliza para interconectar la *EPC* con la plataforma de servicios externos es la interfaz *SGi*.

Una vez descritos los elementos de red e interfaces que integran la arquitectura general de *LTE-Advanced*, a continuación se procede con la torre de protocolos que se utilizan en el plano de usuario y en el plano de control tanto de la red de acceso como de la red de *core* en los distintos nodos e interfaces, hay que mencionar que éstos, son los mismos que se describieron en la sección 2.3.1 para el caso de *E-UTRAN* y 2.3.2 para el caso de *EPC*.

Los protocolos utilizados en la red de acceso para el plano de control son *NAS, RRC, PDCP, RLC, MAC* y de capa 1; mientras que para la red de *core* los protocolos son *S1 AP, X2 AP, SCTP, IP, GTP-C, UDP*, de capa 2 y de capa 1. Con respecto al plano de usuario, los protocolos que se usan para la red de acceso son *PDCP, RLC, MAC*, y de capa física, y para la red de *core* los protocolos son *GTP-U, UDP, IP*, de capa 2 y de capa 1.

Finalmente la interfaz radio de *LTE-Advanced* se basa en los mismos principios utilizados por *LTE*, salvo por las tecnologías de nivel físico empleadas. Los Canales lógicos, canales de transporte y canales físicos utilizados tanto para *downlink* como para *uplink* se explican en las secciones 2.4.1, 2.4.2.4 y 2.4.2.5.

Los canales lógicos para *downlink* son *PCCH, MTCH, MCCH, BCCH, DTCH* y *DCCH*; mientras que para *uplink* son *DTCH, DCCH* y *CCCH*. En cuanto a los canales de transporte, en el *downlink* se utilizan los canales *PCH, MCH, BCH, DL-SCH* y en el *uplink* los canales *UL-SCH* y *RACH*. Por último, los canales físicos para *downlink* son *PMCH, PBCH, PDSCH, PCFICH, PDCCH, PHICH* en tanto que para *uplink* se tienen los canales *PUCCH, PUSCH* y *PRACH*.

En definitiva debe quedar claro que *LTE-Advanced* es la evolución de *LTE* a nivel de capa física para poder ser considerada una tecnología 4G.

3.1.4 CARACTERÍSTICAS QUE DEFINEN A *LTE-Advanced* ^{[1] - [8], [13], [16], [17], [18]}

Las principales características de *LTE-A* que fueron añadidas a *LTE* en la versión 10 son:

- Agregación de portadora
- Transmisión de múltiples antenas para el *downlink* mejorado.
- Transmisión de múltiples antenas para el *uplink*.
- *CoMP* (*Coordinated multipoint transmission and reception*)
- *Relaying*

A continuación se describen cada una de ellas con mayor detalle.

3.2 AGREGACIÓN DE PORTADORA ^{[1]-[4], [12], [13], [15], [16], [17]}

LTE Advanced necesita de un ancho de banda de 100Mhz para su operación como tecnología 4G, el problema es que hoy en día ningún operador tiene esta cantidad de espectro asignada, lo que sí tienen es bloques de frecuencia en bandas diferentes. Una motivación para usar agregación de portadora es usar eficazmente el espectro fragmentado independientemente de la velocidad de transmisión pico.

En la versión 8 de *LTE* se usa un único *CC* (*Component Carrier*) ocupando un ancho de banda máximo de 20 Mhz. *LTE Advanced* usa agregación de portadora de hasta cinco componentes de portadoras (*Component Carriers, CCs*) para lograr un gran ancho de banda de transmisión.

Para la operación en modo *FDD*, el número de componentes de portadoras agregadas en el *uplink* y *downlink* puede ser diferente, a pesar de ello *LTE* versión 10 se enfoca en el caso de que las *CCs* del *uplink* no pueden ser mayores a las *CCs* del *downlink*, esto posibilita el uso de espectro fragmentado y ayuda a los operadores de red.

La Figura 3.2 muestra un escenario en el que el *R10 UE* puede tener asignado recursos *DL* y *UL* de 5 componentes de portadoras *CCs*, lo que significa que el ancho de banda máximo es de 100 MHz con *CCs* de 20 MHz cada una, en tanto que los *R8/R9 UEs* pueden tener asignado solamente una única *CC*. Las *CCs* pueden ser de diferentes anchos de banda tal y como lo muestra la figura.

La agregación de portadora en *LTE Advanced* está diseñada para soportar agregación de una variedad de arreglos de distintos *CCs*, esto incluye *CCs* del mismo o de diferentes anchos de banda, *CCs* adyacentes o no adyacentes en la misma banda de frecuencia y *CCs* en diferentes bandas de frecuencia.

Cada *CC* puede tomar un ancho de banda de transmisión diferente correspondiente a anchos de banda de canal de 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 Mhz.

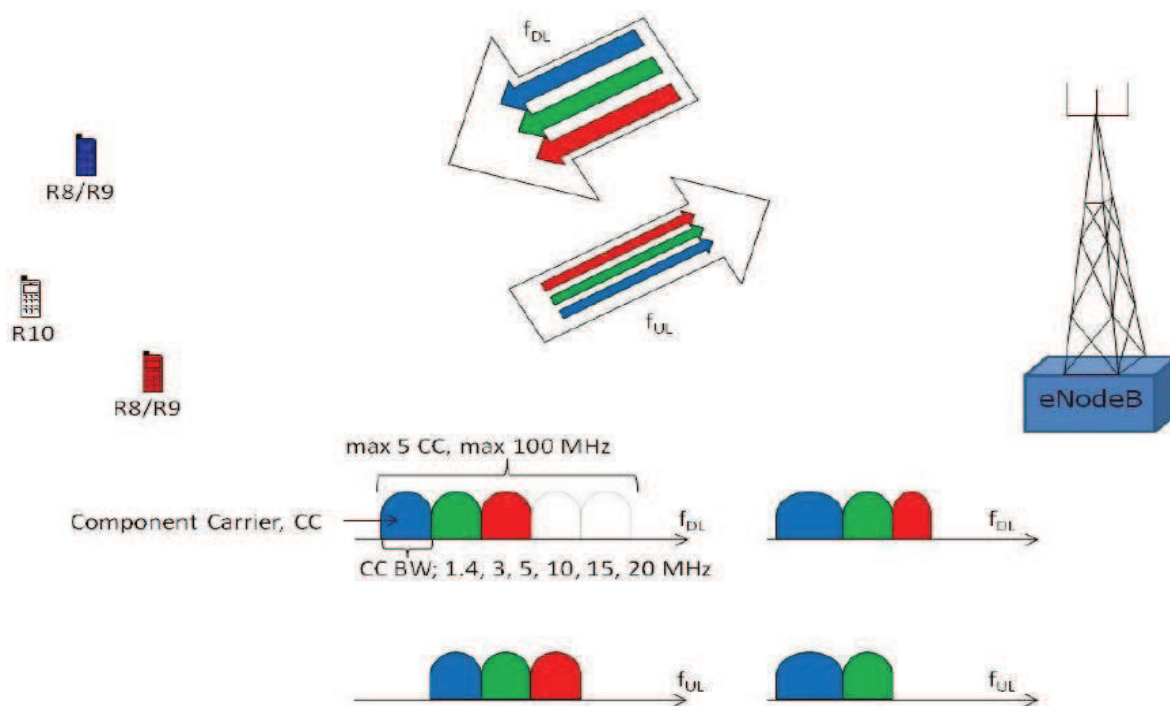


Figura 3.2. Agregación de portadora – FDD ^[4]

En la Figura 3.3 se ilustra a modo de ejemplo las alternativas brindadas por *LTE-Advanced* en cuanto a agregación de portadoras. Comenzando desde arriba, la primera opción representa el uso de CCs contiguas en la misma banda de frecuencia de operación, esto se conoce como intra-banda contigua, la segunda opción hace referencia a una intra-banda no contigua ya que operando en la misma banda de frecuencia las CCs no son contiguas; y, finalmente se tiene la tercera opción en la que se puede operar en distintas bandas de frecuencia con CCs no contiguas, la opción tres también se conoce como banda-inter no contigua. *LTE-Advanced* hace uso de las tres opciones.

Otra motivación para el uso de agregación de portadora es el soporte de redes heterogéneas. Una red heterogénea consiste de una capa de macro-celdas de alta potencia y una capa de celdas pequeñas de baja potencia (picoceldas y femto celdas) con al menos una componente de portadora siendo usada por ambas capas. En esta situación las transmisiones de una celda pueden interferir fuertemente con los canales de control de otra, impidiendo la programación y la señalización. La agregación de portadora hace posible el uso de varias CCs en

ambas capas lo que ocasiona reducción en la interferencia. El llevar a cabo este procedimiento se conoce como *cross-carrier scheduling*. Este procedimiento permite que el CC del canal *PDCCH* de una celda programe los recursos de transmisión de otro CC de otra celda.

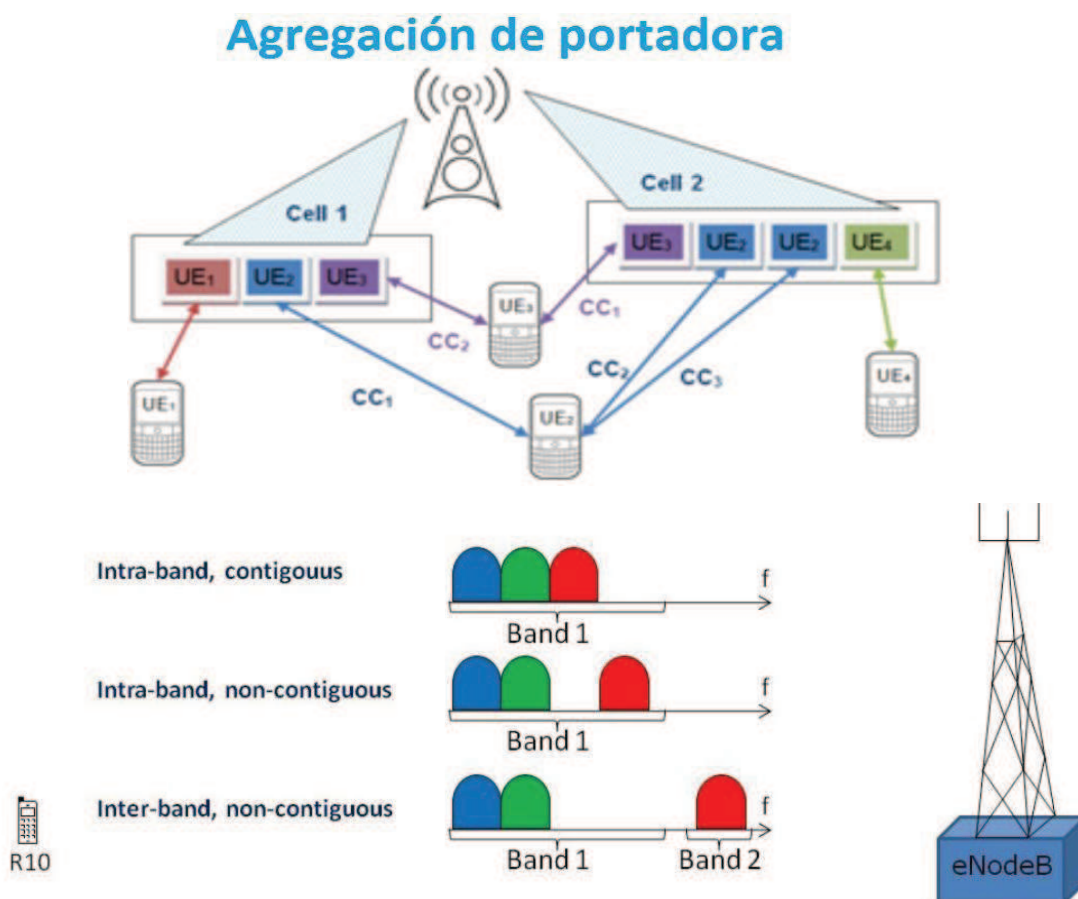


Figura 3.3. Alternativas *intra-band* e *inter-band* para agregación de portadoras. ^{[4], [19]}

Un *UE* que está configurado para usar agregación de portadora se conecta a una *Primary Serving Cell (PCell)* y a más de cuatro *Secondary Serving Cells (SCells)*. La *PCell* es una celda que es configurada durante el establecimiento de una conexión, también se encarga de procedimientos de seguridad, información de movilidad, sistemas de información (*SI*) para configuración de celdas y algunas funciones más.

Una *SCell* es una celda que puede ser configurada después de una conexión ya establecida para proporcionar información y configuraciones de recursos radio.

Cuando se habla de una celda de servicio se puede hablar de una *PCell*, *SCell* o de ambas. La misma estructura de trama se usa en todas las celdas de servicio agregadas.

Las *CCs* correspondientes a una *PCell* se conocen como *Downlink and Uplink Primary Component Carriers (PCCs)*, mientras que las *CCs* correspondientes a una *SCell* se denominan *Downlink and Uplink Secondary Component Carriers (SCCs)*. Todas las *CCs* agregadas se sincronizan y pertenecen al mismo *eNB*.

Al usar agregación de portadora existe un número de celdas de servicio que se asignan, una para cada componente de portadora. Esto es muy útil en términos de cobertura. Diferentes *CCs* se pueden planificar para proveer distintas coberturas, lo que se resume en el manejo de diferentes tamaños de celdas.

La Figura 3.4 muestra las *Serving Cells (PSC y SSC)* con el uso de agregación de portadora. Se puede apreciar que el único terminal móvil que puede hacer uso de las tres *CCs* es el de color negro. Las *PSS (Primary Synchronization Signals)* y las *SSS (Secondary Synchronization Signals)* se transmiten en todas las *CCs* para facilitar la búsqueda de celdas.

Después del proceso de activación inicial, *E-UTRAN* puede configurar los *UEs* que soportan agregación de portadoras con una o más *SCells*, más la *PCell* que se configura durante el establecimiento de la conexión.

El número de celdas de servicio que pueden ser configuradas depende de la capacidad de agregación que tenga el *UE*. En una *SCell* el uso de los recursos tanto para *uplink* como para *downlink* es configurable dependiendo de las circunstancias, por lo tanto el número de componentes de portadora secundarias del *DL* siempre es mayor o igual al número de *UL* y ninguna *SCell* puede ser configurada únicamente haciendo uso de recursos para *UL*.

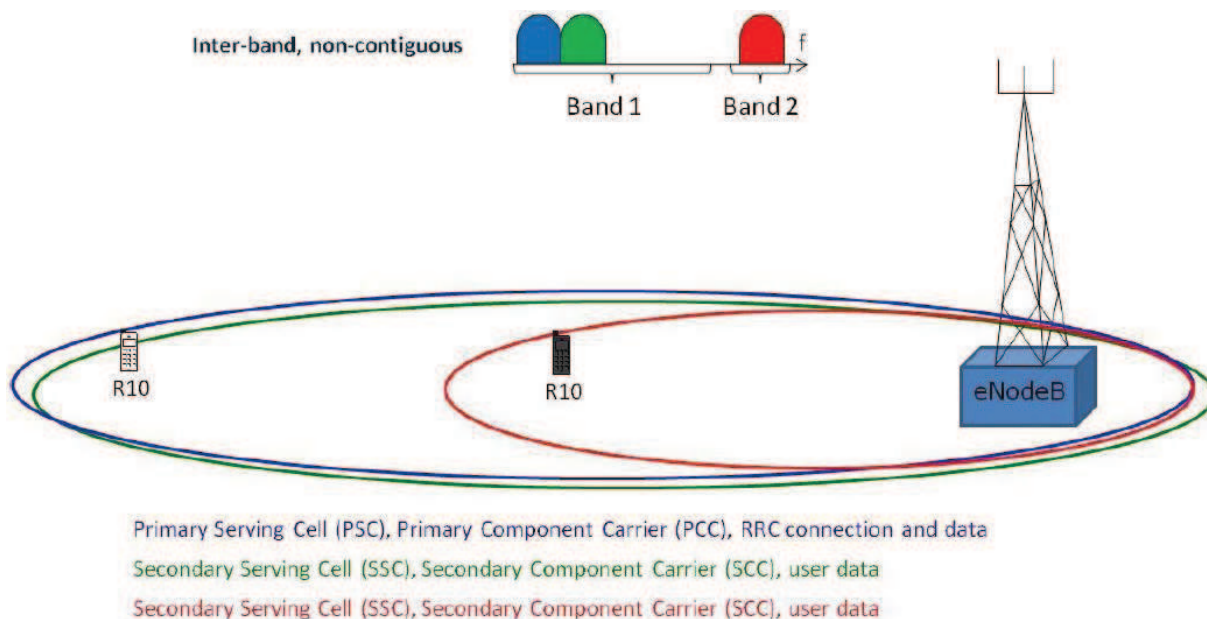


Figura 3.4. *Serving Cells* – Agregación de portadora ^[4]

La *PCell* provee de seguridad, información de movilidad y de un sistema de información para las celdas de servicio. Lo fundamental de una *PCell* es que permite establecer una conexión *RRC* (*Radio Resource Control*), lo que permite tener el control de todas las *CCs* configuradas para determinado *UE*. Después del establecimiento de una conexión *RRC* con la *PCell* se puede realizar procesos de reconfiguración, adición y retiro de *SCells*. Sólo la red puede decidir el cambio de una *PCell* para un *UE*.

Una vez que se alcanza un estado *RRC*, se pueden cambiar las condiciones radio establecidas para un *UE*, como por ejemplo, puede existir un cambio de *CCs* y de igual manera la carga sobre diferentes *CCs* también puede cambiar.

3.3 TÉCNICAS DE MÚLTIPLES ANTENAS PARA *LTE-ADVANCED*

[1], [4] [8]

Las técnicas de múltiples antenas juegan un papel muy importante en *LTE-Advanced* ya que el principal objetivo es superar a las versiones previas. Dependiendo de las condiciones radio a las que está sometido un *UE* se han asignado diferentes modos o esquemas de transmisión (*TM* – *Transmission*

Modes) basadas en técnicas mencionadas. Para el caso de la versión 10 se ha introducido el modo *TM9* para el *DL*, en tanto que para el *UL* se ha introducido el *TM2*. Gracias a la introducción de estos modos en *LTE-Advanced* se soporta *MIMO 8x8* en el *DL* y *4x4* en el *UL*.

Con respecto al *downlink* se mejora *SU-MIMO* y consecuentemente se incrementan las velocidades de transmisión; y, de la misma manera mejorando las técnicas *MU-MIMO* se consigue un aumento en la eficiencia espectral. Para llevar a cabo estas mejoras y avances se introducen nuevas señales de referencia y mejores *UEs*. En el *uplink* en cambio se introduce por primera vez *SU-MIMO* y se mejora la técnica de acceso.

3.3.1 MIMO MEJORADO EN *LTE-ADVANCED* ^{[1]-[9]}

Para soportar una eficiencia espectral pico en el *DL* de 30 bps/Hz y de 15 bps/Hz en el *UL*, *LTE-Advanced* plantea la introducción de esquemas de múltiples antenas basadas en *MIMO 8x8* y *MIMO 4x4*, *DL* y *UL* respectivamente, para lo cual en *LTE-A* se distinguen principalmente dos opciones: la primera se denomina *single-site MIMO* en donde solamente una estación base es utilizada para la transmisión y la segunda se denomina *multi-site MIMO* donde varias estaciones base pueden colaborar en la transmisión de un único flujo de información.

- a) **Single-Site MIMO:** Esta opción se basa en la conformación de haces de radiación para un usuario en específico. Los patrones de radiación que se forman van a depender de las antenas que se usan, de la movilidad del *UE* y del tamaño de la celda. En definitiva *Single-Site MIMO* es una combinación entre multiplexación espacial y conformación de haces tanto para *SU-MIMO* y *MU-MIMO* en el *DL*. En la siguiente figura se puede apreciar cómo una sola estación base puede establecer comunicación con 2 *UEs* en base a haces de radiación distintos.

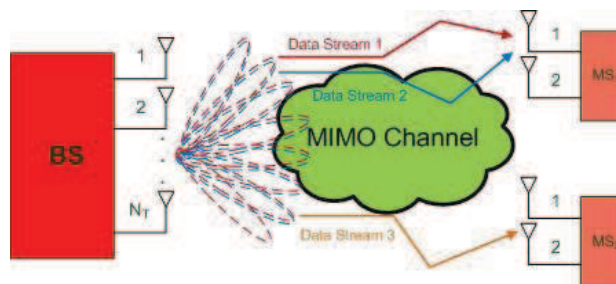


Figura 3.5 Escenario de *Single-Site MIMO* [8]

b) **Multi-Site MIMO:** Esta opción busca mejorar el rendimiento en el borde de una celda por medio de la multiplexación espacial de diferentes estaciones base que comparten los mismos recursos espectrales para lo cual se introduce la técnica *Co-operative MIMO*, también conocida como *Network MIMO* y como *Coordinated multipoint (CoMP)*. En este caso las distancias entre los elementos de transmisión pueden ser de varios kilómetros por lo que es necesario disponer del suficiente ancho de banda de transmisión en el *backhaul*²⁶ y hacer que las latencias sean cercanas a 1ms.

En la Figura 3.6 se puede observar el modo de operación de *Multi-Site MIMO*, en este caso los *RBs* asignados a los *UEs* en los bordes de las celdas son coordinados por dos *eNBs*.

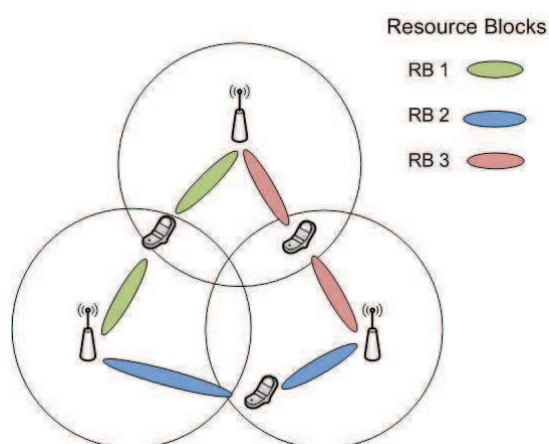


Figura 3.6. Escenario de *Multi-Site MIMO* [8]

²⁶ *Backhaul:* Un *backhaul* es una red de retorno. Un ejemplo lo constituye un radioenlace que conecta una estación base con el *core* de la red. Las redes de retorno conectan redes de datos, redes de telefonía celular y otros tipos de redes de comunicación, además de ser usadas para interconectar redes entre sí utilizando diferentes tipos de tecnologías alámbricas o inalámbricas.

3.3.2 MIMO EN EL *DOWNLINK* DE *LTE-ADVANCED*

3.3.2.1 Transmisión de Múltiples Antenas en el *downlink*

En *LTE-Advanced* la transmisión de la información se puede realizar mediante dos técnicas: *SU-MIMO* y *MU-MIMO*. En *SU-MIMO* versión 10 la tendencia es usar 8 capas espaciales y un máximo de 2 *codewords* con 8 puertos de antena porque ello permite mejorar la velocidad de transmisión. A continuación se muestra en la Figura 3.7 cómo se dividen las *codewords* en sus respectivas *layers* en *LTE-Advanced*. Se puede apreciar que se pueden utilizar 5, 6, 7 y hasta 8 *layers* con el uso de máximo dos *codewords* *CWs* y 8 puertos de antena.

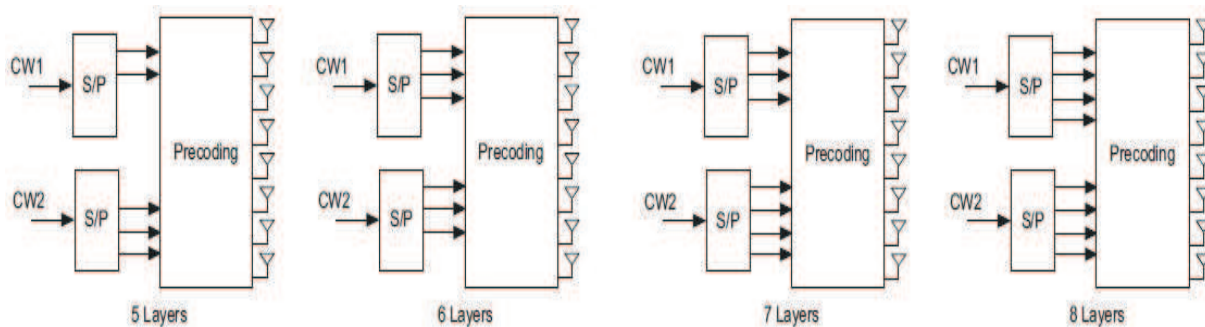


Figura 3.7. *Codewords* y *layers* para 8 puertos de antena. ^[1]

Con respecto a *MU-MIMO* para el *DL*, *LTE-Advanced*, versión 10, presenta una nueva propuesta basada en el intercambio dinámico entre *SU-MIMO* Y *MU-MIMO* y mejoras en la transmisión del canal *PDSCH*. La provisión de nuevos modelos de señales de referencia (*DM-RS* y *CSI-RS*) permiten la programación de más de una secuencia espacial en los *UEs* que participan en *MU-MIMO*. La multiplexación ortogonal de las señales de referencia asignadas a los *UEs* posibilita tener una estimación más precisa del canal y mejorar los procedimientos de cancelación de interferencia en el *UE*. A pesar de que el *Release 10* soporta multiplexación ortogonal de 8 *layers*, el máximo destinado para multiplexación multi-usuario es 4.

3.3.2.2 Señales de Referencia en el *downlink*

Las señales de referencia *RSs* son usadas por los *UEs* en la versión 10 por dos razones, la primera es que en base a ellas es posible realizar la demodulación de los datos correctamente y la segunda es porque permiten determinar la información del estado del canal radio, es decir permiten tener un conocimiento de la calidad y propiedades espaciales de éste.

En vista de que *LTE-Advanced SU-MIMO DL* soporta hasta 8 capas espaciales para transmisión, es necesario mejorar las señales de referencia que se manejan; y, por eso a la versión 8 de LTE que usa solamente las señales *CRSs* (*Common Reference Signals*) se aumentan dos *RSs* más, éstas son: *Downlink Reference Signals for Demodulation (DM-RS)* y *Channel State Information Reference Signals (CSI-RS)*.

- a) ***Downlink Reference Signals for Demodulation (DM-RS)***: De la misma forma que en versiones previas, las *DM-RS* o *UE-specific RSs* de *LTE-A* se ubican en *RBs* del canal *PDSCH* para determinado *UE* y experimentan la misma precodificación que se hace a los símbolos de los datos y, por lo tanto no es necesario establecer una señalización y precodificación específica para este tipo de señales. Sin embargo, en *LTE-A* se implementan una variedad de técnicas de múltiples antenas basadas en conformación de haces de radiación para la precodificación.

El nuevo modelo de los *REs* (*Resource Elements*) diseñado para las nuevas *RSs* debe satisfacer dos criterios. Primeramente se debe evitar el solapamiento de las *DM-RSs* con las señales *CRSs*, en segundo lugar las *UE-specific RSs* de diferentes *layers* deben estar multiplexadas ortogonalmente, para evitar de esta manera la interferencia que pueda producirse entre *RSs*. Esto se puede llevar a cabo en principio asignando un conjunto de diferentes *REs* a las *RSs* de las diferentes *layers* por *Code*

Division Multiplexing (CDM). El modelo utilizado en *LTE-A* para 4 *layers* se puede observar en la Figura 3.8 (a), las 4 *layers* precodificadas se encuentran agrupadas en grupos de 2 *REs*. Las *UE-specific RSs* en los diferentes grupos se encuentran multiplexadas en frecuencia sobre subportadoras adyacentes.

En el modelo de 8 *layers* que se presenta en la Figura 3.8 (b), el escenario ideal para *SU-MIMO 8-layer* sería asignar 4 *REs* a las *RSs* de las diferentes *layers*, lo que se conoce como transmisión *Rank-4*.

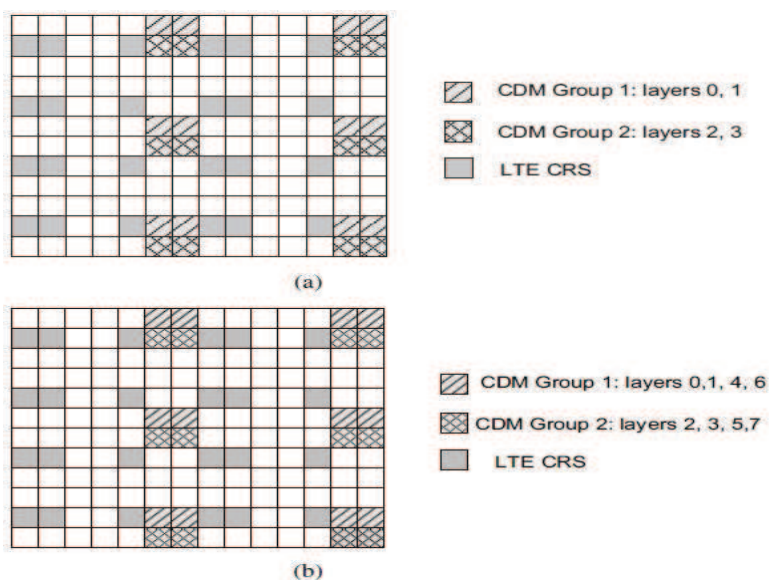


Figura 3.8. Modelos de *DM-RS* o *UE-specific RSs* en el *Release 10 LTE-A*. (a) 4 *layers*
(b) 8 *layers* ^[1]

b) Downlink Channel State Information Reference Signals (CSI-RS): El principal objetivo de las señales *CSI-RSs* es obtener la información del estado del canal a través de los puertos de las antenas transmisoras, para de esta manera poder asistir al *eNB* en sus tareas de precodificación de la información. La versión 10 soporta transmisión de *CSI-RS* para 1, 2, 4 y 8 puertos de antena. Las *CSI-RSs* también posibilitan al *UE* estimar la *CSI* de múltiples celdas en vez de estimar únicamente la de la misma celda de servicio. Esto posibilita implementar esquemas de transmisión cooperativos multi-celda. En el contexto de *Cooperative MIMO*, es posible mejorar la

estimación del canal y especialmente la estimación de la interferencia simplemente coordinando la transmisión de las *CSI-RS*s entre las celdas en cuestión.

Para el diseño de las señales *CSI-RS* se plantean los siguientes principios:

- a) Es deseable que las señales *CSI-RS* se encuentren espaciadas uniformemente en el dominio de la frecuencia.
- b) En el dominio del tiempo es deseable minimizar el número de subtramas que contengan las *CSI-RS* para que el *UE* también pueda estimar las *CSIs* de la misma celda y más aún de celdas distintas.
- c) Las señales *CSI-RS* de diferentes puertos de antena dentro de una celda y de diferentes celdas deben estar multiplexadas ortogonalmente para tener una estimación precisa del estado del canal.
- d) Para asegurar la compatibilidad con versiones previas, las señales *CSI-RS* deben evitar usar los *REs* asignados para las *CRSs* y canales de control de la versión 8, tanto como los *REs* asignados a las señales *DM-RSs* de la versión 10.

Los modelos de *CSI-RS* seleccionados para la versión 10 se muestran en la Figura 3.9, tomando en cuenta las consideraciones mencionadas anteriormente. Se usan códigos *CDM* de longitud 2, por lo que las *CSI-RSs* de 2 puertos de antenas comparten 2 *REs* en determinada subportadora. En la mencionada figura los *REs* usados por las *CSI-RSs* tienen 2 subíndices, el primero indica el índice de la celda y el segundo se refiere a los puertos de antenas usados para transmitir las *CSI-RSs* sobre el *RE*.

Estos modelos siguen una estructura anidada, es decir que los *REs* usados en el caso de 2 *CSI-RS* puertos de antena son un subconjunto de aquellos usados para 4 y 8 puertos de antena, esto ayuda a simplificar la implementación.

El modelo mostrado en la Figura 3.9 (a) puede ser usado en una estructura de trama tipo 1 (*FDD*) y también en una estructura de trama tipo 2 (*TDD*); en cambio el modelo mostrado en la Figura 3.9 (b) solamente puede ser usado en una estructura de trama tipo 2 en operación *TDD*.

Finalmente en el esquema de la Figura 3.9 (a) puede haber colisiones con las *CRSs* de la versión 8 aunque sean mínimas, en tanto que el modelo presentado en (b) está diseñado para evitar las colisiones con las *RSs* de la versión 8. Sin embargo la opción (b) permite usar factores de reuso de frecuencia de 3 y 12, dependiendo del número de puertos de antena por celda, lo cual es limitado con respecto a (a) que permite factores de reuso de frecuencia de 5, con 8 puertos de antena por celda, y 20 con 2 puertos de antena por celda, lo que significa que el número total de puertos de antena soportados en el modelo propuesto en (a) es de 40.

3.3.2 MIMO EN EL UPLINK DE LTE-ADVANCED

3.3.2.1 Transmisión de Múltiples Antenas en el UPLINK

En la versión 10 de *LTE* se introduce por primera vez la transmisión *SU-MIMO*. Ésta se realiza en 4 capas espaciales para incrementar la velocidad de transmisión del canal *PUSCH*. Entonces se introducen dos modos de transmisión:

- *Modo de transmisión 1 PUSCH*: Transmisión de una única antena.
- *Modo de transmisión 2 PUSCH*: Transmisión de múltiples antenas, dentro de este modo, el *UE* puede ser configurado para transmitir usando 2 o cuatro antenas.

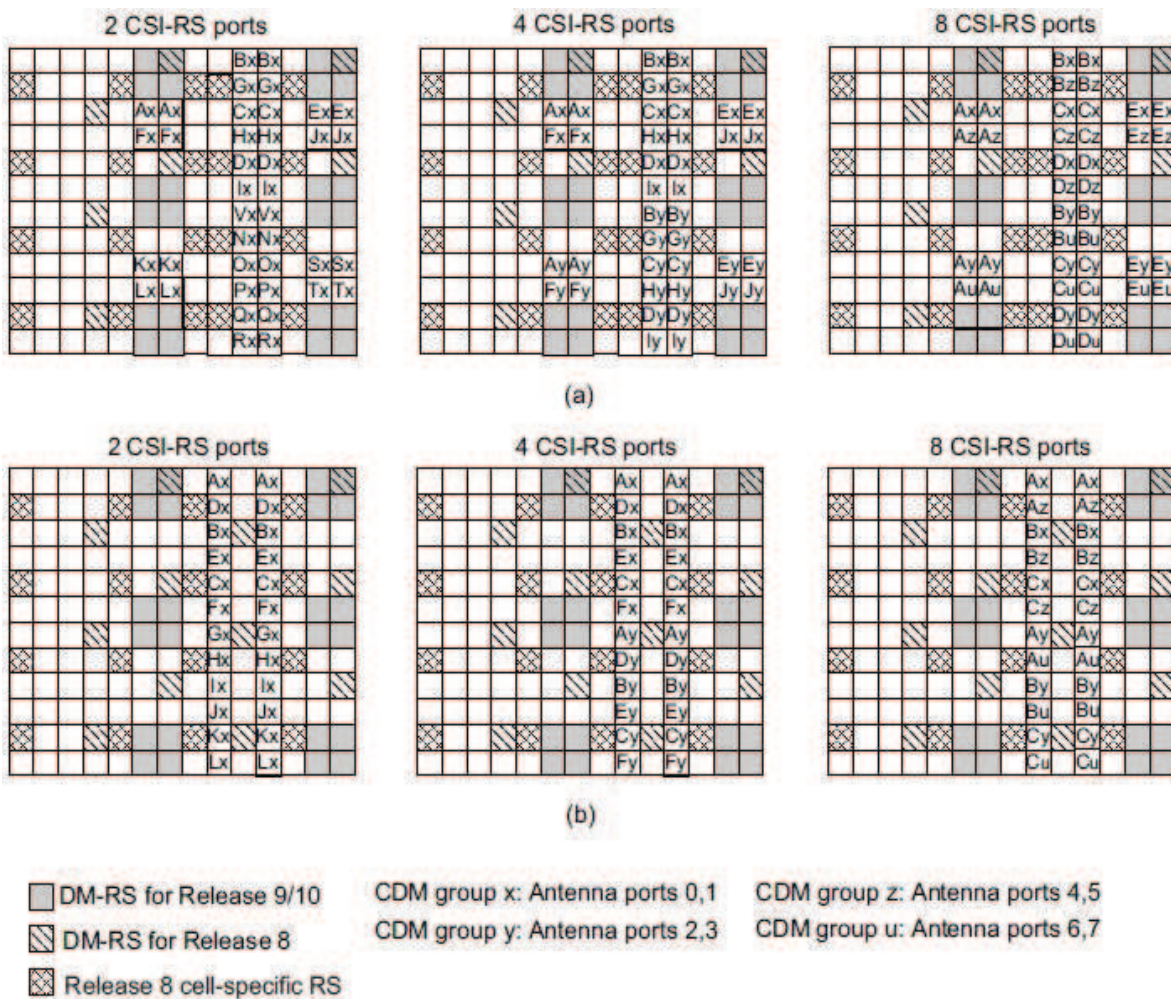


Figura 3.9. Modelos CSI-RS para LTE-Advanced. (a) Modelo para estructura de trama tipo 1 y tipo 2. (b) Modelo para estructura de trama tipo 2 ^[1]

En cuanto al canal *PUCCH* la confiabilidad de la señalización de control se mejora usando diversidad de transmisión, lo que también permite mantener compatibilidad con el canal *PUCCH* de la versión 8, esto es algo nuevo que se implementa en *LTE-A*.

Las señales de referencia usadas en el *UL* de la versión 8 se mejoran para soportar transmisión *SU-MIMO* con cuatro antenas.

3.3.2.2 Esquema de acceso mejorado en el *UL*

La técnica de acceso en el *UL* especificada en la versión 8 de *LTE*, *SC-FDMA*, es una técnica poderosa que combina muchos de los aspectos de *OFDM* con una baja relación de potencia pico a potencia promedio (*peak to average power ratio*, *PAPR*) en un sistema de portadora única. Sin embargo hay que tener claro que bajo estos argumentos *SC-FDMA* requiere de asignación de portadora a través de un bloque continuo de espectro, pero en *LTE-A* ya no se hace uso de portadora única ni se trabaja con bloques de espectro continuo, es por ello que se implementa la tecnología basada en agregación de portadora explicada anteriormente, para así obtener el ancho de banda deseado. Por lo tanto *LTE-A* mejora el esquema de acceso en el *uplink* adoptando una característica nueva en *SC-FDMA* conocida como *Clustered SC-FDMA* o *Discrete Fourier Transform Spread OFDM (DFT-S-OFDM)*.

Este nuevo esquema es similar a *SC-FDMA*, pero tiene la ventaja de permitir que grupos de subportadoras no contiguas puedan ser asignadas a un *UE* para la transmisión, lo que posibilita una planificación selectiva en frecuencia en el *uplink* y un mejor rendimiento del enlace.

Se escogió la técnica *Clustered SC-FDMA* por la preferencia de *OFDM* y para evitar incrementos significativos en el *PAPR*. Esto permitirá satisfacer los requisitos de una incrementada eficiencia espectral en el *uplink* manteniendo la compatibilidad con versiones previas de *LTE*.

En la Figura 3.10 se presenta cómo funciona el nuevo esquema de acceso en el *uplink*, aquí se muestran dos componentes de portadora, en cada *CC* se encuentran asignados los canales *PUCCH* y *PUSCH* correspondientes a dos conexiones, dicho de otra manera, se puede apreciar una transmisión paralela de un acceso doble de *LTE* versión 8. De acuerdo con esta forma de acceso, al menos se deben utilizar dos *CCs* para formar un *Clustered SC-FDMA*.

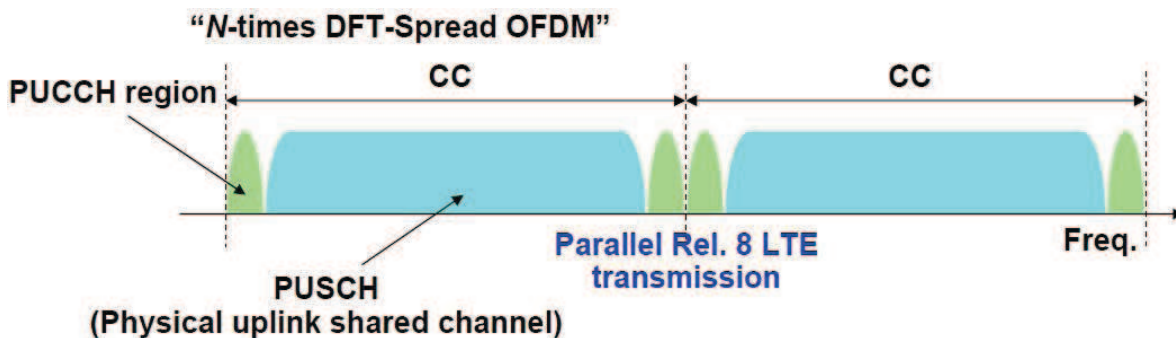


Figura 3.10. Esquema de acceso múltiple en el *uplink*. [6]

3.3.2.3 Señales de Referencia en el *uplink*

En la versión 10, las *DeModulation Reference Signals (DM-RSs)* son mejoradas para soportar transmisión *SU-MIMO* en el *uplink* de hasta 4 capas espaciales y las *Sounding Reference Signals (SRSs)* para proveer un soporte mejorado en el *channel sounding*.

- a) **Uplink DeModulation Reference Signals (DM-RSs):** Para soportar transmisiones *SU-MIMO* de 4 capas espaciales, las señales *DM-RSs* de todas las capas necesitan multiplexarse en el *eNB*. En el *uplink* las señales *DM-RSs* son precodificadas usando la misma precodificación usada para la transmisión de los datos en el *Physical Uplink Shared Channel (PUSCH)*.
- b) **Uplink Sounding Reference Signals (SRSs):** Las señales *SRSs* son muy importantes en el *uplink channel sounding* ya que gracias a ellas es posible asignar recursos dinámicamente. Estas señales también son consideradas para esquemas de transmisión *Cooperative MIMO* y para la coordinación de la interferencia inter-celda.

3.4 COORDINATED MULTIPOINT (CoMP) TRANSMISSION AND RECEPTION [1], [2], [4], [10], [8], [14]

CoMP no se ha incluido en los estándares de la versión 10 del 3GPP, pero su trabajo está en marcha y se estudiará fuertemente en las versiones futuras. A pesar del hecho de que la versión 10 no provee un soporte específico para *CoMP*, algunos esquemas pueden ser implementados en las redes *LTE* versión 10 de una manera apropiada. Esto permitirá optar por una actualización más sencilla a futuro.

La transmisión y recepción basada en la técnica *coordinated multipoint* es una tecnología donde múltiples antenas de varias celdas son utilizadas, de tal manera que tanto las antenas de la celda de servicio así como las antenas de las celdas vecinas contribuyen en mejorar la calidad de la señal recibida en el *UE* y en el *eNodeB*, tanto como la reducción de la interferencia co-canal producida de las celdas adyacentes.

Coordinated multipoint es un conjunto de diferentes técnicas que posibilitan la coordinación dinámica entre diferentes estaciones base tanto para transmisión como para recepción, donde el objetivo es incrementar el rendimiento en los bordes de una celda.

La idea principal de *CoMP* es que un *UE* pueda recibir señales de varios *eNB* y cuando éste quiera hacer una transmisión varios *eNB* reciban las señales enviadas por éste independientemente de la carga del sistema.

Uno de los problemas que se ha estudiado por años es el que tiene que ver con los efectos producidos por la interferencia ocasionada por las celdas vecinas, por tal motivo *LTE-Advanced CoMP* convierte la interferencia inter-celda (*Inter-Cell Interference, ICI*) en una señal útil. Este tipo de problemas se pueden resolver mediante una planificación y transmisión conjunta entre varias celdas.

Gracias a la coordinación y combinación de las señales de múltiples antenas, *CoMP* brinda a los usuarios móviles la posibilidad de que ellos disfruten de un gran rendimiento y calidad cuando ellos comparten o acceden a videos, fotos y otros servicios que demanden de gran ancho de banda, aún si ellos se encuentran ubicados en el centro de la celda o en los extremos de ésta. Lo

fundamental es brindar un correcto servicio y de igual manera mejorar el uso de la red.

En resumen *CoMP* es considerado por el *3GPP* como una herramienta usada para mejorar la cobertura, el *throughput* en los bordes de las celdas y por lo tanto la eficiencia del sistema.

La Figura 3.11 muestra a varios *eNBs* que se coordinan dinámicamente permitiendo que exista planificación, transmisión y procesamiento conjunto. De esta forma en el borde de una celda el *UE* puede ser atendido por dos o más *eNBs* mejorando la transmisión/recepción y *throughput*.

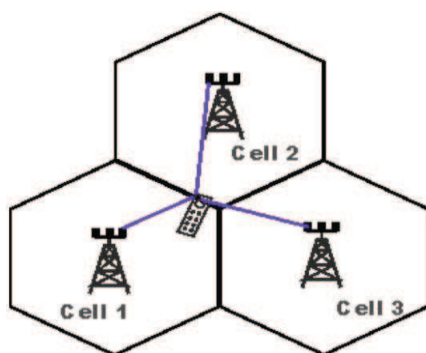


Figura 3.11. *LTE-Advanced CoMP* ^[10]

Existen dos variantes de *CoMP*:

- **Procesamiento conjunto (*Joint processing*)**: Ocurre cuando se produce una coordinación entre varios *eNBs* que están transmitiendo o recibiendo en conjunto información para o del *UE*.
- **Planificación coordinada / Conformación de haz coordinado (*Coordinated Scheduling / Coordinated Beamforming – CS / CB*)**: Es una forma de coordinación donde un *UE* se encuentra transmitiendo con un solo *eNB*. Sin embargo la comunicación entre *eNBs* es fundamental para realizar intercambio de información de control, planificación y conformación de haces de radiación para de esta manera seleccionar qué estación base entra en el proceso.

Las técnicas usadas por *CoMP* son muy diferentes para el *uplink* y el *downlink*.

3.4.1 DOWNLINK LTE COMP

Requiere coordinación entre varios *eNBs* cuando están transmitiendo al *UE*. En el *downlink* hay dos formatos de *CoMP* que se presentan a continuación:

- **Joint Processing para transmitir en el DL:** Usando este tipo de formato los datos son transmitidos al *UE* simultáneamente de un número X de *eNBs*. Esta forma de *CoMP* utiliza grandes recursos en la red porque los datos que se van a transmitir al *UE* tienen que pasar por cada *eNB* involucrado en el proceso. El consumo de los recursos de red será el doble o el triple dependiendo de cuántos *eNBs* se encuentren transmitiendo.

En la Figura 3.12 se puede ver que los datos son transmitidos desde las diferentes estaciones base al mismo tiempo, por lo tanto se requiere de una sincronización y de enlaces de gran velocidad entre estaciones base. Dos técnicas son posibles: *fast cell selection*, en donde solo una estación base transmite a la vez y, *joint transmission* donde los datos son transmitidos por varios *eNBs* al mismo tiempo y luego combinados coherentemente en el terminal.

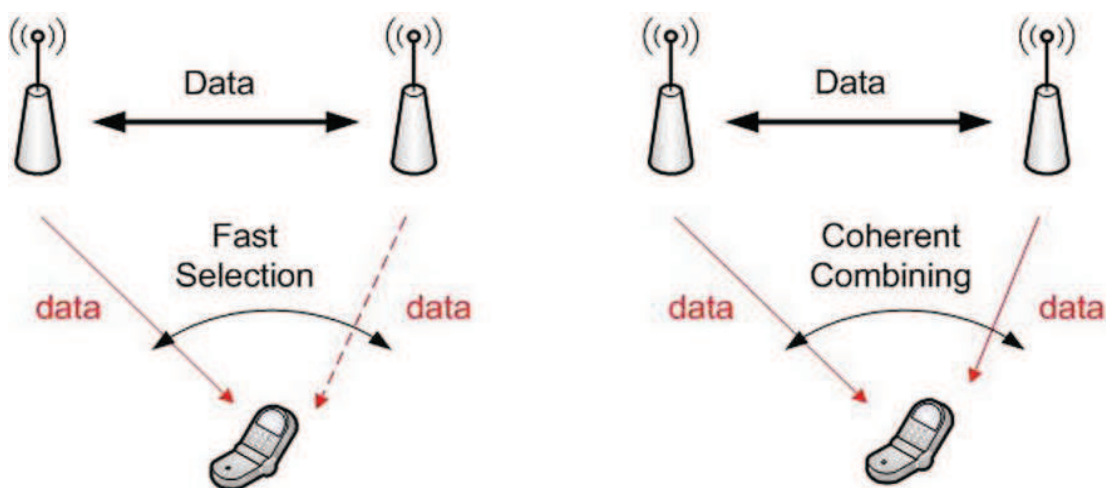


Figura 3.12. Joint Processing ^[8]

- **CS / CB en el DL:** En este caso los datos a ser enviados al *UE* en cuestión provienen de un solo *eNB*. Aquí tanto la planificación como la conformación de haces es coordinado para evitar problemas de interferencias que puedan ser generados en el proceso de transmisión. Este formato tiene una gran ventaja ya que la transmisión es uno a uno por lo que no se requiere de tantos recursos de red como en el caso anterior. Los *eNBs* solo se comunican para tomar decisiones de planificación y conformación de haces. En la Figura 3.13 se puede apreciar claramente cómo los datos son transmitidos de un solo *eNB* a su respectivo *UE*, pero las estaciones base están conectadas la una con la otra para poder intercambiar información de planificación y conformación de haz.

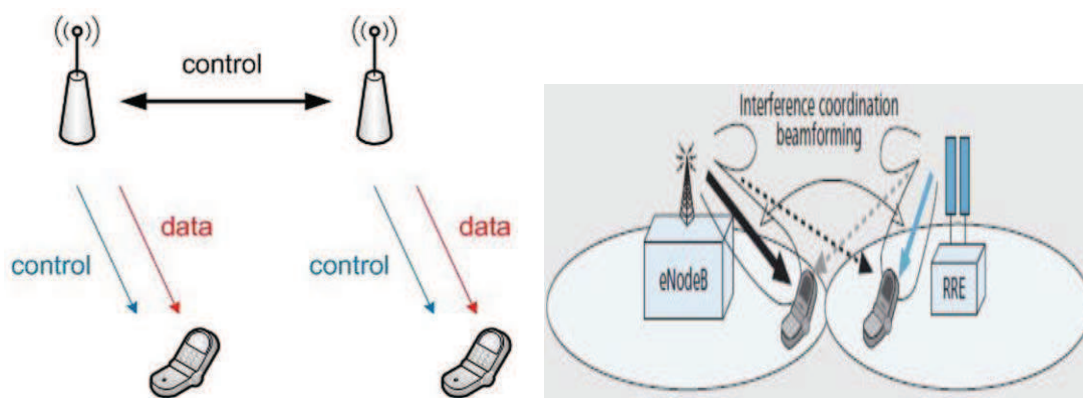


Figura 3.13. Coordinated Scheduling / Coordinated Beamforming – CS / CB ^{[8], [14]}

3.4.2 UPLINK LTE COMP

- **Joint Reception:** La combinación de varias antenas de diferentes *eNBs* puede ser utilizada para formar arreglos (*arrays*) de antenas virtuales y de esta manera las señales recibidas por los *eNBs* luego son combinadas y procesadas para producir la señal de salida final. La principal desventaja de esta técnica es la enorme cantidad de datos que necesitan ser transferidos entre los *eNBs* para su operación.

- **Coordinated scheduling (CS):** Este esquema se encarga de coordinar las decisiones de planificación entre los *eNBs* para minimizar la interferencia. Tal como en el caso de *downlink*, no se carga mucho a la red, solamente los datos de planificación necesitan enviarse entre los *eNBs*.

3.4.3 VENTAJAS DE *CoMP*

Con el uso de *CoMP* existen bastantes ventajas tanto para el usuario como para el operador de red, a continuación se mencionan algunas:

- *CoMP Transmission/Reception* mejora significativamente el *throughput* de un usuario en el borde de una celda empleando coordinación multi-celda.
- Mejor utilización de la red proveyendo de conexiones simultáneas de varias estaciones base.
- Funcionamiento de recepción mejorado, lo que permite que el número de conexiones caídas se reduzca.
- Reducción de interferencia haciendo que la misma interferencia causada por celdas vecinas sea útil.

3.5 RELAYING (RED DE NODOS RELAY) ^{[1], [4]}

El *Relaying* es una nueva característica en *LTE-Advanced* que se basa en el uso de una red de *Relay Nodes (RNs)* que permitirán complementar las macro-celdas incrementando así la cobertura y la capacidad de la red.

Los *RNs* pueden ser considerados desde cierto punto de vista como repetidores. Pero la verdad es que se diferencian el uno del otro.

Los repetidores son considerados nodos encargados de amplificar la señal de radiofrecuencia recibida de una estación base, tienen un costo muy bajo y eso se debe a que no realizan tareas de procesamiento de señal en banda base. Son típicamente usados en lugares donde el tráfico es bastante ligero o cuando el

acceso a la red se dificulta como en las áreas rurales, son también usados para proveer cobertura en ambientes *indoor*, en un *shopping mall* por ejemplo. A pesar de lo útiles que son tienen dos inconvenientes: el primero es que solo amplifican la señal recibida y por lo tanto cualquier interferencia también es amplificada, debido a ello la señal se degrada y por ende no es la misma en comparación con una señal transmitida desde la estación base. El segundo inconveniente tiene que ver con operación y mantenimiento (O&M) ya que los repetidores son operados independientemente de la red de acceso, lo que involucra un costo adicional para los operadores de red.

Los *RNs* pueden ser vistos como una evolución de los repetidores para resolver los inconvenientes presentados por éstos. Un *RN* es un nodo de red que está conectado inalámbricamente a un *eNB* fuente, llamado *donor eNB*. Una característica importante de los *RNs* es que comparten funcionalidades propias de un *eNB* tales como el monitoreo y control remoto.

En contraste con un repetidor, un *RN* procesa la señal recibida antes de reenviarla. Este procedimiento involucra operaciones de Capa 1, 2 o 3. Hay que tomar en cuenta también que el retardo mínimo producido por un repetidor es bajo comparado con un *RN*. Un *RN* tiene dos fases de transmisión para poder entregar la señal recibida del *donor eNB* al *UE*. En la Figura 3.14 se muestran las fases de transmisión y recepción que se producen en un repetidor y en un *RN*.

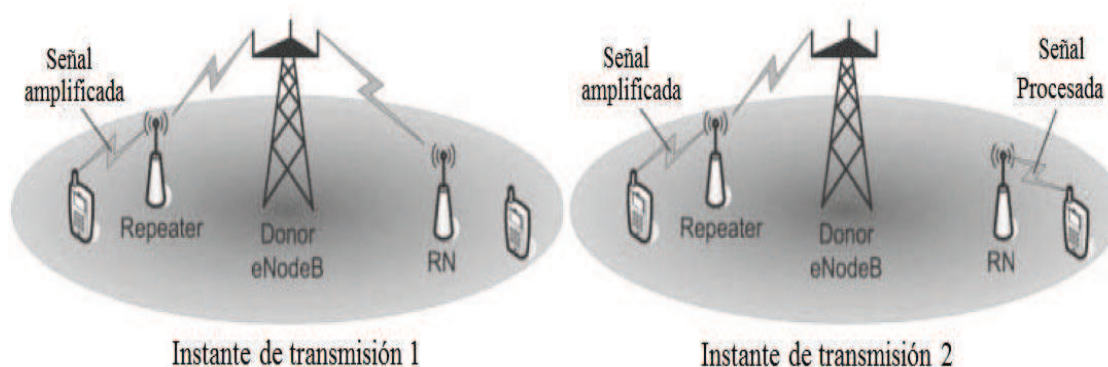


Figura 3.14. Fases de transmisión y recepción de un repetidor y un *relay node*. [1]

En la Figura 3.15 se pueden apreciar los nombres de los enlaces y elementos que integran una arquitectura de *relaying*, a continuación se explican de izquierda a derecha cada uno de ellos.

- **Direct link (Uplink/Downlink).** Se conoce como *Direct downlink*, al enlace entre el *donor eNB* y el *UE*, y, *direct uplink*, al enlace entre el *UE* y el *Donor eNB*.
- **Donor eNB.** Es un *eNB* fuente el cual se comunica con los *RNs* a través del *backhaul link*, y, con los *UEs* a través del *direct link*.
- **Donor cell.** Es el área de cobertura que proporciona un *Donor eNB*.
- **Backhaul link (Uplink/Downlink).** Se denomina *backhaul downlink*, al enlace entre el *donor eNB* y el *RN*, y *backhaul uplink*, al enlace entre el *RN* y el *Donor eNB*.
- **Relay Node (RN).** Es el elemento de red que permite interconectar los elementos de la *Donor cell* con los elementos de la *Relay Cell*.
- **Relay cell.** Área de cobertura brindada por un *RN*.
- **Access link (Uplink/Downlink).** Se conoce como *Access downlink* al enlace entre el *RN* y el *UE*, y, *Access uplink*, al enlace entre el *UE* y el *RN*.

Una vez que se han explicado los elementos y enlaces que intervienen en la Figura 3.15, a continuación se presentan dos términos que se utilizan cuando se habla de *relay nodes (RNs)*.

- **RN Inband/outband.** Un *RN inband* usa la misma frecuencia de portadora en el *backhaul link* y en el *access link*. Si se utilizan diferentes frecuencias de portadora entonces el *RN* se conoce como *RN outband*.
- **RN Half/full duplex.** Se conoce como *RN half dúplex* al *RN* que no puede estar recibiendo información en el *backhaul link* y al mismo tiempo estar transmitiendo en el *access link*, y, viceversa. Un *RN full dúplex* puede operar sin esta restricción. Finalmente, un *RN* que sea considerado como *half dúplex* también se lo considera como *inband* y si es *full dúplex* entonces también es *outband*.

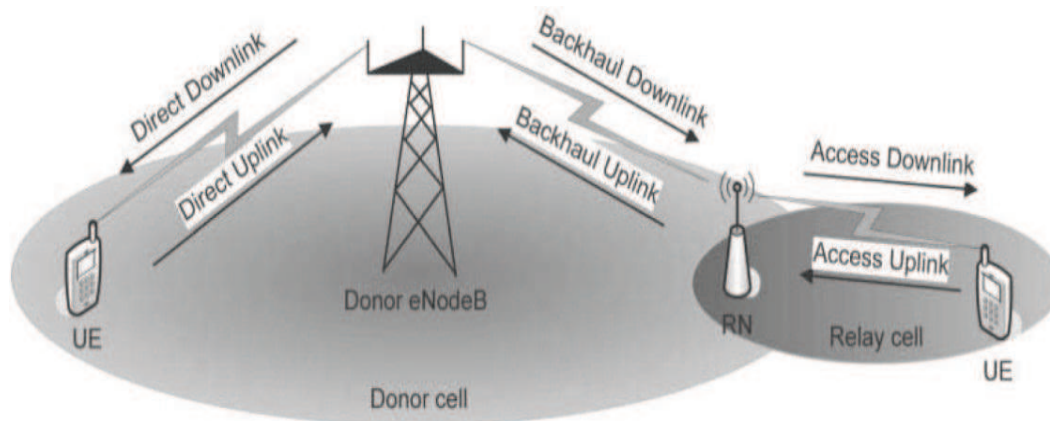


Figura 3.15. Terminología para relaying ^[1]

3.5.1 ESCENARIOS DE DESPLIEGUE

A continuación se muestran seis escenarios donde se utilizan los RNs, en cada uno se indica el ambiente en el que trabajan y la cobertura que brindan.

a) Ampliación de la cobertura de la celda en zonas rurales

Los RNs pueden ser usados en zonas rurales ya que ellos proveen de una gran zona de cobertura, lo que significa que un RN presenta una potencia de transmisión similar a la de un macro eNB, es decir potencias cercanas a los 46dBm. Los RNs son útiles para aplicaciones de alta frecuencia así como redes 3G, posibilitando la misma cobertura incluso en condiciones de propagación extremas, sin el incremento del número de estaciones base.

b) Escenario en ambientes *outdoor* urbanos y suburbanos

Este escenario se muestra en la Figura 3.16 (b), aquí los RNs son usados para proveer de servicio y cobertura a ciertas áreas particulares de una celda o para intentar obtener un *throughput* en el borde de la celda similar al ofrecido por ésta cuando los usuarios se encuentran en zonas que no están en el límite. En ambientes urbanos se usan potencias de transmisión de 30 dBm o menores debido al tamaño pequeño de la celda y a efectos de interferencia inter-celda. En ambientes suburbanos la potencia de transmisión es cercana a los 37 dBm.

c) Mejora de la cobertura en ambientes internos

En este tipo de escenarios los *RNs* pueden estar localizados en el interior de edificios para proveer a los usuarios de una cobertura interna mejorada. La Figura 3.16 (c) muestra este escenario. En esta situación los *RNs* pueden ser vistos como *femto eNBs* o *Home eNodeBs*. En ambientes *indoor* los *RNs* deben tener una baja potencia de transmisión para evitar problemas de interferencia.

d) Escenarios de puntos muertos

En este tipo de escenarios los *RNs* son usados para proveer de cobertura a los puntos en donde la señal no llega por motivos de grandes obstáculos como los edificios por ejemplo. En este tipo de escenario, el *RN* es ubicado en línea de vista con el *donor eNodeB* y luego se encarga de radiar a los puntos afectados. La Figura 3.16 (d) muestra este escenario.

e) Despliegues de corto tiempo

Los *RNs* son muy útiles para soluciones en las que se necesita de cobertura por periodos cortos de tiempo como en eventos especiales de juegos deportivos, conciertos y eventos públicos, incluso para soporte en caso de averías en los equipos de la red cuando éstos se dañan por desastres naturales.

f) Movilidad en grupo

Un *RN* también es capaz de proveer cobertura a pasajeros de buses, trenes e incluso barcos. El *RN* se puede ubicar sobre el vehículo y conectarse al *donor eNodeB* más apropiado conforme el vehículo se mueva. En un vehículo en movimiento un *RN* provee mejor cobertura que una macro *eNB*, también existe un ahorro de energía en las baterías del *UE* en el *UL* debido a que con los *RNs* la potencia de transmisión también se reduce.

3.5.2 TIPOS DE RELAY NODES ^[1]

El 3GPP identificó dos tipos de *RNs*, *Type1, 1a y 1b*; y *Type2* en el estudio de *LTE-Advanced*. Dentro de las especificaciones de la versión 10, *LTE-A* soporta

los RNs *Type 1* y *Type 1a*. Los demás casos aún continúan en estudio y aún no han sido adoptados.

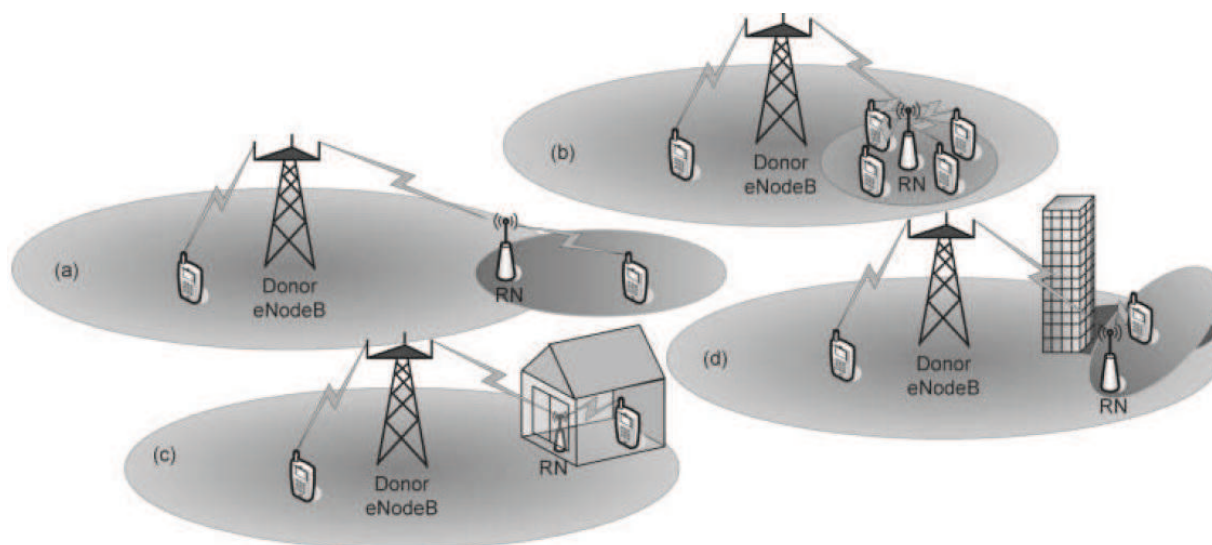


Figura 3.16. Casos típicos de relays. ^[1]

a) RNs *Type 1*, *1a* y *1b*: De forma general los RNs del *Type 1* transmiten todos los canales de datos y control incluyendo las señales de sincronización *PSS / SSS*. Los *UEs* reciben información de programación y planificación a través del canal *PDCCH* desde el RN y envían información de regreso informando acerca de la información del estado del canal. Haciendo una analogía los RNs *Type 1* son *eNBs* versión 8, así es la forma en que los *UEs* los ven. Es por ello que se garantiza compatibilidad con versiones previas a la versión 10.

Los RNs *Type 1* son nodos que se usan para transmisiones *half duplex inband* en tanto que los RNs *Type 1a* son nodos *outband full duplex* que presentan las mismas propiedades de los RNs *Type 1*. Por su parte los RNs *Type 1b* son nodos *inband full duplex* en el que los enlaces de *backhaul* y de acceso pueden estar activos simultáneamente. A manera de ejemplo, en un RN *Type 1b* la antena de *backhaul* puede estar localizada fuera de un edificio mientras que la antena de cobertura puede estar localizada en el interior del mismo.

b) **RNs Type 2:** Este tipo de nodos no pueden ser identificados por los *UEs* ya que no transmiten canales de control ni tampoco tienen su propio identificador de celda. Estos *RNs* solo transmiten el canal *PDSCH* y el elemento que toma cartas en el asunto con respecto a la planificación es el *eNB*. Los *RNs Type 2* pueden operar de una manera cooperativa o no cooperativa con el *donor eNB*.

Cuando operan cooperativamente, el *eNB* y el *RN* se juntan para la transmisión y recepción de la señal para el *UE* y del *UE* respectivamente, tal como se ilustra en la Figura 3.17, en donde la transmisión inicial la realiza el *eNB* para el *RN* y el *UE* al mismo tiempo. En caso de retransmisiones, ambos, el *eNB* y el *RN* transmiten al *UE* y éste combina las dos señales.

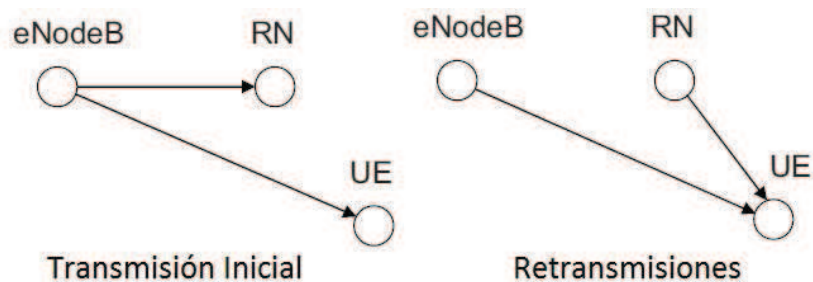


Figura 3.17 Operación cooperativa de los *RNs Type 2*. ^[1]

REFERENCIAS DEL CAPÍTULO 3

- [1] SESIA, Stefania; TOUFIK, Issam; BAKER, Matthew. LTE – The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice. Segunda Edición. Editorial WILEY. 2011.
- [2] RUMNEY, Moray. LTE and the Evolution to 4G Wireless. Editorial WILEY. 2009.
- [3] Rohde & Schwarz España. *LTE (Long Term Evolution): El siguiente nivel*.
- [4] LTE-Advanced: <http://www.3gpp.org/lte-advanced>
http://www.3gpp.org/IMG/pdf/lte_advanced_v2.pdf
- [5] CLERCKX, Bruno; LOZANO, Angel; SESIA, Stefania; VAN RENSBURG, Cornelius; PAPADIAS, Constantinos B. *3GPP LTE and LTE Advanced. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2009.
<http://downloads.hindawi.com/journals/specialissues/0002009007.pdf>
- [6] NAKAMURA, Takehiro. *Proposal for Candidate Radio Interface Technologies for IMT-Advanced Based on LTE Release 10 and Beyond (LTE-Advanced)*. 3GPP TSG-RAN. 2009.
http://www.3gpp.org/IMG/pdf/2009_10_3gpp_IMT.pdf
- [7] Agilent Technologies. *Introducing LTE-Advanced*. 2011.
<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5990-6706EN.pdf>
- [8] LTE-Advanced and the Evolution to 4G Cellular Systems.
<http://www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn/ltea/projectdescription.html>
- [9] New challenges for LTE and MIMO receiver test.
<http://www.eetimes.com/design/test-and-measurement/4210806/New-challenges-for-LTE-and-MIMO-receiver-test>

- [10] 4G LTE CoMP, Coordinated Multipoint
<http://www.radio-electronics.com/info/cellular telecomms/lte-long-term-evolution/4g-lte-advanced-comp-coordinated-multipoint.php>
- [11] 4G LTE Advanced Relay
<http://www.radio-electronics.com/info/cellular telecomms/lte-long-term-evolution/4g-lte-advanced-relaying.php>
- [12] WANNSTROM, Jeanette. *LTE - Advanced*. 2012.
- [13] Rohde & Schwarz. *LTE - Advanced Technology Introduction*. 2010.
- [14] OGUNFOWORA, Tosin; KYUCHUKOVA, Diyana. *Coordinated Multi-Point Transmission/Reception*. 2011.
- [15] 4G Americas. *HSPA+LTE Carrier Aggregation*. 2012.
- [16] Qualcomm. *LTE Advanced*. 2012.
<http://www.qualcomm.com/media/documents/files/lte-advanced-the-global-4g-solution.pdf>
- [17] CALVO LOGROÑO, Gerardo. *LTE-ADVANCED RELEASE 10*. 2010.
- [18] Videos *LTE-Advanced*.
http://article.wn.com/view/2012/08/08/Research_and_Markets_LTE_Advanced_3GPP_Solution_for_IMTAdvan/
- [19] Rohde & Schwarz. *Testing LTE-Advanced Application Note*. 2012.
http://www2.rohde-schwarz.com/file_19119/1MA166_2E.pdf

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LTE Y LTE- ADVANCED

En base al estudio y análisis de los capítulos dos y tres es posible desarrollar una comparación entre *LTE* y *LTE-Advanced*, es por ello que en el presente capítulo se presentan comparaciones entre la versión 8 y la versión 10 de *LTE*. Las comparaciones que se presentan tienen que ver con bandas de frecuencia, arquitectura, capa física, esquemas de modulación, velocidad de transmisión, técnicas de múltiples antenas, equipo de usuario, servicios, aplicaciones, despliegue de redes y lanzamiento comercial.

4.1 COMPARACIÓN TECNOLÓGICA ^[2]

LTE-Advanced es la evolución de *LTE* para conseguir velocidades de transmisión superiores. Para lograr aquello se debe buscar soluciones que contribuyan al objetivo, es por ello que *LTE-Advanced*, en sus especificaciones de la versión 10 de *LTE*, menciona el empleo de nuevas técnicas que ayudarán a mejorar el sistema pero manteniendo las bases iniciales con las que el sistema fue concebido, por eso algunos consideran a *LTE-Advanced* como la misma tecnología *LTE* que cumple con los requisitos del *IMT-Advanced* para ser considerada una tecnología *4G*.

Estas nuevas características que hacen que mejore el sistema son: agregación de portadora, sistemas de transmisión de múltiples antenas mejorado, *CoMP* y *relaying*. Aunque en la versión 10 no se detallan a profundidad *CoMP* y *Relaying*, se cimentan las bases para futuras versiones.

A modo de resumen cuando se trata de definir las características principales de una tecnología celular se consideran los parámetros más importantes para realizar su descripción, estos parámetros tienen que ver con velocidad de

transmisión, ancho de banda, eficiencia espectral, latencia, movilidad, cobertura y capacidad. En la Tabla 4.1 se realiza una comparación entre las tecnologías celulares *LTE* y *LTE-Advanced* tomando como argumento los parámetros descritos anteriormente.

Parámetro		LTE		LTE-Advanced	
Velocidad de transmisión pico	DL	300 Mbps (MU-MIMO 4x4, 64QAM, 20 MHz)	1.2 Gbps (SU-MIMO 8X8, 64 QAM, 2 CCs 40 MHz)	Agregación de portadora, MIMO	
	UL	75 Mbps (MU-MIMO 4x4, 64 QAM, 20 MHz)	600 Mbps (SU-MIMO 4X4, 64 QAM, 2 CCs 40 MHz)		
Ancho de banda soportado		Hasta 20 MHz (1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz)	Hasta 100 Mhz	Agregación de portadora	
Eficiencia espectral	Pico [bps/Hz]	DL	15	30	8x8 SU-MIMO
		UL	3.75	15	4x4 SU-MIMO
	Promedio [bps/Hz]	DL	1.87	3.7	CoMP, MIMO
		UL	1	2	CoMP, MIMO,
	Borde de la celda [bps/Hz]	DL	0.06 (MIMO 4x2)	0.12 (MIMO 4x4)	CoMP, MIMO
		UL	0.03 (MIMO 2x4)	0.07 (MIMO 2x4)	CoMP MIMO,
Latencia en el plano de usuario		< 30 ms	< 10 ms		

Parámetro	LTE	LTE-Advanced
Latencia en el plano de control	< 100 ms	< 50 ms
Movilidad	Optimizado para bajas velocidades (< 15 km/hr) hasta los 120 km/hr. Los enlaces se mantienen hasta velocidades de 350 km/hr.	Optimizado para bajas velocidades (< 15 km/hr) hasta los 120 km/hr. Los enlaces se mantienen hasta velocidades de 350 km/hr.
Radio de cobertura de una celda	5 km	5 km
Número de usuarios en una celda	200 usuarios activos por celda en 5 MHz	600 usuarios activos por celda en 5 MHz

Tabla 4.1. Comparación entre *LTE* y *LTE-Advanced*.²⁷

Una vez que se han puesto en consideración los parámetros más relevantes que describen el alcance de una tecnología celular en la Tabla 4.1, a continuación se realiza un análisis de los mismos.

Los parámetros basados en movilidad, radio de cobertura y número de usuarios en una celda son los elementos que definen las características bajo las cuales se ha evaluado el sistema. Las mismas condiciones se han aplicado tanto a *LTE* como a *LTE-Advanced*.

En movilidad, lo óptimo para alcanzar la velocidad de transmisión y la eficiencia espectral especificada en la Tabla 4.1 es cuando los usuarios se transportan a velocidades inferiores a los 15 km/hr, los valores pueden ir decrementando conforme se aumente la velocidad con la cual viaja el usuario, pero aún así, la disminución no es muy significativa hasta velocidades de 120 km/hr, a 350 km/hr se puede tener acceso a la red celular pero bajo condiciones no muy favorables para el usuario, es decir, el usuario presentará problemas en la comunicación.

²⁷ Tabla realizada por el autor del presente Proyecto de Titulación basándose en la fuente [2].

El radio de cobertura de una celda que se propone para este análisis es de 5 km para ambas tecnologías. Esto no quiere decir que *LTE* o *LTE-Advanced* deban utilizar este valor. Existen celdas con radios de cobertura que van desde 1 km hasta 35 km y serán usadas independientemente para coberturas urbanas, suburbanas, rurales y carreteras. La distancia que se propone aquí es para un ambiente urbano. El número de usuarios activos en una celda bordea los 200 para *LTE* y el triple en *LTE-Advanced* con un ancho de banda de 5 MHz en cada caso.

La latencia tanto en el plano de usuario como en el plano de control representa la suma de los retardos producidos por la demora en la propagación, transmisión de los paquetes y el procesamiento en cada entidad de red. El plano de usuario refleja esta latencia en una conexión de extremo a extremo a través de los servicios portadores *EPS* y servicios portadores externos. En cuanto al plano de control, esta latencia se refleja en el control del establecimiento de los servicios portadores.

En *LTE* la latencia en el plano de usuario es inferior y cercana a los 30 ms, en *LTE-Advanced* este retardo es de 10 ms. En el plano de control el retardo es mucho mayor, para *LTE* bordea los 100 ms y para *LTE-Advanced* los 50 ms. Como se puede apreciar el procesamiento de las entidades de red en *LTE-Advanced* es mucho más rápido que en *LTE*.

Con respecto a la velocidad de transmisión pico en el *downlink*, *LTE* alcanza una velocidad de 300 Mbps aproximadamente ya que utiliza una configuración *MU-MIMO 4x4* y en el *uplink* 75 Mbps con una configuración *MIMO* similar al *downlink*. En ambos casos la modulación es *64QAM* y el ancho de banda utilizado es de 20 MHz.

En *LTE Advanced* la velocidad que se alcanza es de 1.2 Gbps para el *downlink*, utilizando una configuración *SU-MIMO 8x8* y agregación de portadora con el uso de dos componentes de 20 MHz cada una obteniéndose un ancho de banda total de 40 MHz. El ancho de banda utilizado para el *uplink* es el mismo que el de *LTE*, la velocidad de transmisión es de 600 Mbps y se utiliza una configuración *SU-MIMO 4x4*. Similar a *LTE*, *LTE-Advanced* también utiliza modulación *64QAM*.

Con respecto a la eficiencia espectral, la Tabla 4.1 presenta tres tipos de eficiencia espectral, la pico, la promedio y en el borde de la celda, en cuanto a la eficiencia espectral pico hay que señalar que ésta ha sido obtenida al dividir la velocidad de transmisión pico para el ancho de banda, 20 MHz en el caso de *LTE* y 40 MHz en el caso de *LTE-Advanced*. La eficiencia espectral promedio indica valores que son obtenidos en la práctica en donde se considera un escenario real, de manera similar sucede con la eficiencia espectral en el borde de la celda.

Un análisis más profundo con respecto a la velocidad de transmisión y la eficiencia espectral se presenta en la sección 4.6 del presente capítulo.

4.2 COMPARACIÓN DE BANDAS DE FRECUENCIA ^{[3], [7], [8]}

Las bandas de frecuencia asignadas para las tecnologías *LTE* y *LTE-Advanced* son heredadas de tecnologías previas, es decir, bandas que en principio fueron asignadas a tecnologías 3G.

En *LTE* las bandas de frecuencia están especificadas por el *IMT-2000*, y a diferencia de las bandas heredadas de *UMTS*, *LTE* añade 8 bandas nuevas para operación en modo *dúplex TDD*. Por otro lado, *LTE-Advanced* utiliza nuevas bandas de frecuencia debido al uso de más espectro por parte de la tecnología, las nuevas bandas asignadas están especificadas por el *IMT-Advanced*. A continuación, en la Tabla 4.2 se presentan, en color negro, las bandas de frecuencia asignadas tanto para *LTE* como para *LTE-Advanced* y en color rojo, las bandas de frecuencia adicionales para *LTE-Advanced*.

Indagando aún más la Tabla 4.2 se puede constatar que el ancho de banda asignado para el enlace descendente es el mismo que el ancho de banda asignado para el enlace ascendente indistintamente del modo *dúplex* que se aplique. Otro aspecto a tener en cuenta es que en *dúplex FDD* existe un ancho de banda de espaciamiento entre el *uplink* y el *downlink* que es variable, en tanto que, en *dúplex TDD* no existe tal espaciamiento.

Banda de operación	Uplink		Downlink		Ancho de banda tanto en <i>uplink</i> como en <i>downlink</i> [MHz]	Espaciamiento entre <i>uplink</i> y <i>downlink</i> [MHz]	Modo Dúplex
	Low [MHz]	High [MHz]	Low [MHz]	High [MHz]			
1	1920	1980	2110	2170	60	130	FDD
2	1850	1910	1930	1990	60	20	FDD
3	1710	1785	1805	1880	75	20	FDD
4	1710	1755	2110	2155	45	355	FDD
5	824	849	869	894	25	20	FDD
6	830	840	875	885	10	35	FDD
7	2500	2570	2620	2690	70	50	FDD
8	880	915	925	960	35	10	FDD
9	1749.9	1784.9	1844.9	1879.9	35	60	FDD
10	1710	1770	2110	2170	60	340	FDD
11	1427.9	1452.9	1475.9	1500.9	25	23	FDD
12	698	716	728	746	18	12	FDD
13	777	787	746	756	10	21	FDD
14	788	798	758	768	10	20	FDD
15	1900	1920	2600	2620	20	680	FDD
16	2010	2025	2585	2600	15	560	FDD
17	704	716	734	746	12	18	FDD
18	815	830	860	875	15	30	FDD
19	830	845	875	890	15	30	FDD
20	832	862	791	821	30	71	FDD
21	1447.9	1462.9	1495.9	1510.9	15	33	FDD
22	3410	3500	3510	3600	90	10	FDD
33	1900	1920	1900	1920	20	0	TDD
34	2010	2025	2010	2025	15	0	TDD
35	1850	1910	1850	1910	60	0	TDD
36	1930	1990	1930	1990	60	0	TDD
37	1910	1930	1910	1930	20	0	TDD
38	2570	2620	2570	2620	50	0	TDD
39	1880	1920	1880	1920	40	0	TDD
40	2300	2400	2300	2400	100	0	TDD
41	3400	3600	3400	3600	200	0	TDD

Tabla 4.2. Bandas de frecuencia asignadas para LTE (negro) y LTE-Advanced (rojo).^[7]

Tanto para enlace descendente como ascendente las bandas de frecuencia en modo *TDD* son las mismas.

Analizando las bandas de frecuencia en las que puede operar tanto *LTE* como *LTE-Advanced*, es evidente que *LTE-Advanced* es una tecnología compatible con *LTE* ya que puede operar en las mismas bandas de frecuencia que esta tecnología tal y como lo muestra la Figura 4.1. En esta figura en color azul se encuentran las bandas de frecuencia asignadas para *LTE* y en color rojo las bandas de frecuencia para *LTE-Advanced*.

La Figura 4.1 se encarga de proporcionar información visual sobre el ancho de banda que tiene cada banda de operación, de acuerdo a esta figura que está basada en la Tabla 4.2, el ancho de banda más bajo que se le puede asignar a *LTE* o a *LTE-Advanced* es de 10 MHz, como ejemplo están la banda 6, 13 y 14; esto quiere decir que usando estas bandas de frecuencia para implementar una red *LTE*, ésta se vería forzada únicamente a proporcionar velocidades de transmisión teóricas de 50 Mbps para *downlink* y de 25 Mbps para *uplink*, con una antena en el *UE* y dos antenas en la estación base, es decir, aproximadamente la mitad con respecto a lo que puede brindar la misma red *LTE* implementada en una banda que tenga como mínimo 20 MHz de ancho de banda, como es el caso de la banda 15.

Hay que tomar en cuenta que estas velocidades son alcanzadas por un único usuario, cuando se conecten más usuarios la velocidad de transmisión ya no será la misma y por lo tanto se tendrá una tecnología subutilizada ya que el mejor aporte es cuando se utiliza todo el ancho de banda previsto para dicha tecnología, 20 MHz en el caso de *LTE* y 100 MHz en el caso de *LTE-Advanced*.

El hecho de que *LTE* pueda trabajar con anchos de banda variables (1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz) beneficiará al operador ya que dependiendo de la tarifa que pague el usuario se asignarán más o menos recursos. Es por ello que un ancho de banda de 60 MHz, se puede dividir en tres partes de 20 MHz cada una, que sería el caso ideal, pero ciertamente que no va a ser así, en realidad se puede dividir en distintas combinaciones; a modo de ejemplo se puede considerar la siguiente distribución: 2 asignaciones de 15 MHz, 2 de 5 MHz y una de 20 MHz.

Así *LTE* pueda operar en las distintas bandas de frecuencia que se muestran en la Tabla 4.2, en la práctica no es común encontrar redes *LTE* funcionando en esas frecuencias, es más, hoy por hoy la banda de frecuencia que está siendo utilizada mayoritariamente en el mundo es la banda *FDD* de 1800 MHz, el motivo es simple, la mayoría de redes *UMTS* a nivel mundial están funcionando en esa banda.

Por su parte *LTE-Advanced* es realmente una red fácilmente adaptable ya que al incorporar la técnica de agregación de portadoras, se pueden usar hasta 5 asignaciones de diferente ancho de banda de distinta banda de frecuencia para lograr sumar hasta un ancho de banda de 100 MHz, las asignaciones pueden tener un ancho de banda de hasta 20 MHz.

Por el momento, conseguir un ancho de banda de 40 MHz es un logro que cumple con las especificaciones impuestas por el *IMT-Advanced* para tecnologías *4G*, es por ello que los operadores esperan lanzar sus futuras redes con este ancho de banda inicial.

De las nuevas bandas *FDD* asignadas para *LTE-Advanced*, la que mayor ancho de banda tiene es la banda 22 con un ancho de banda de 90 MHz, 10 MHz menos del valor que se esperaría, pero como *LTE-Advanced* es adaptable, los 10 MHz faltantes se podría usar de otra banda. El beneficio inmenso que trae la agregación de portadoras es que se puedan utilizar las distintas bandas que se ha dispuesto en la Tabla 4.2 de la manera que el operador considere más conveniente.

Con respecto a las bandas que operan en modo *TDD*, la que mayor ancho de banda tiene es la banda 41 con 200 MHz. Pero estas bandas no son factibles de ser utilizadas, el motivo es el siguiente: en términos de cobertura mientras más se escala en frecuencia el radio de cobertura que presenta una celda es mucho menor y entonces esto no es conveniente en términos de costos ya que se necesitaría tener un mayor número de radio bases en un radio de cobertura que podría ser brindado por una sola radio base, en este caso por un solo *eNB*.

En definitiva, en *LTE* y en *LTE-Advanced* es mejor utilizar bajas frecuencias en zonas rurales y de baja densidad poblacional para conseguir una gran cobertura

de banda ancha, la banda de 700 MHz puede ser una muy buena opción. En términos de costos operar en la banda de 700 MHz es más barato que operar en la banda de los 2100 MHz.

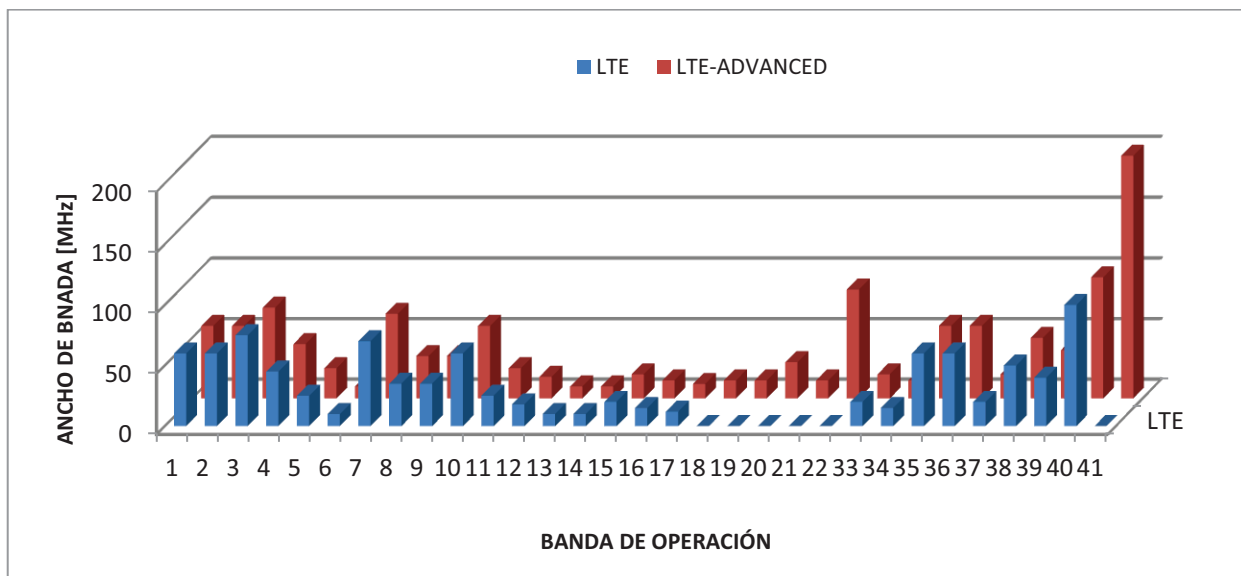


Figura 4.1 Anchos de banda asignados para las distintas bandas de frecuencias en las que puede trabajar *LTE* y *LTE-Advanced*.²⁸

En ciudades debido al alto tráfico de datos lo deseable es operar en bandas de frecuencia altas como 2500-2600 MHz, pero se pretende utilizar las bandas de frecuencia en las que operan tecnologías previas tales como *GSM* y *UMTS*, es decir, la banda de 850 MHz, 1500 MHz, 1700 MHz y 1900 MHz. De hecho éstas son las bandas donde los operadores desean implementar sus redes ya que con ello se ahorran el pago de nuevas licencias de radio, pero al utilizar dichas bandas deben contar con una gran cantidad de espectro ya que se deberá soportar el tráfico de *GSM* y *UMTS* más el tráfico generado por las nuevas tecnologías, en este caso *LTE* y *LTE-Advanced*.

²⁸ Gráfico elaborado por el autor del Presente Proyecto de Titulación.

4.3 COMPARACIÓN DE LA ARQUITECTURA DE RED ^{[3], [8]}

LTE y *LTE-Advanced* se basan en la arquitectura de red descrita en la sección 2.3, es decir una plataforma netamente basada en *IP* que se extiende desde el *eNB* hasta el núcleo de paquetes evolucionado. Ambas tecnologías presentan cuatro elementos principales: el equipo de usuario, la red de acceso *E-UTRAN*, la red de *core EPC* y los servicios brindados a través de *IMS* e *Internet*. La Figura 4.2 resume la configuración básica de la arquitectura del sistema, presentando los elementos principales, nodos lógicos, interfaces y conexiones.

La red de acceso está formada por radio bases denominadas *eNBs*, las cuales cumplen un papel muy importante dentro de la arquitectura, ya que se encargan de aliviar el trabajo de la *EPC*, ejecutando procedimientos de tratamiento y administración de la información para realizar una gestión eficiente de los recursos radio disponibles. En definitiva, el *eNB* al ser el elemento más importante de la red *E-UTRAN* permite la conectividad con elementos *EPC* y equipo de usuario.

La interconexión del equipo de usuario con los *eNBs* se realiza a través de la interfaz *Uu*, la interconexión entre los *eNBs* y la *EPC* a través de la interfaz *S1*, y finalmente la interconexión entre *eNBs* a través de la interfaz *X2*.

Desde el punto de vista del núcleo de la red o del *EPC*, *LTE* y *LTE-Advanced* tienen elementos capaces de soportar tráfico netamente *IP* y para lograrlo dentro de su esquema presentan tres elementos fundamentales que permitirán la movilidad del usuario, éstos son: el *MME*, el *SG-W* y el *PG-W*.

El *MME* es el responsable de la señalización, mientras que los dos *Gateways*, *SG-W* y *PG-W* se emplean para los datos del usuario. Por medio de la interfaz *S1*, *E-UTRAN* se interconecta con la *EPC* de la siguiente manera: el *eNB* se interconecta con la entidad *MME* a través de la interfaz *S1-MME*, y mediante la interfaz *S1-U*, con la entidad *S-GW*, tal como se ilustra en el Figura 4.2. Los dos *Gateways* son dos entidades lógicas del plano de usuario que forman el *SAE*

Gateway y que permiten la interconexión entre la red de acceso y las diferentes redes de paquetes.

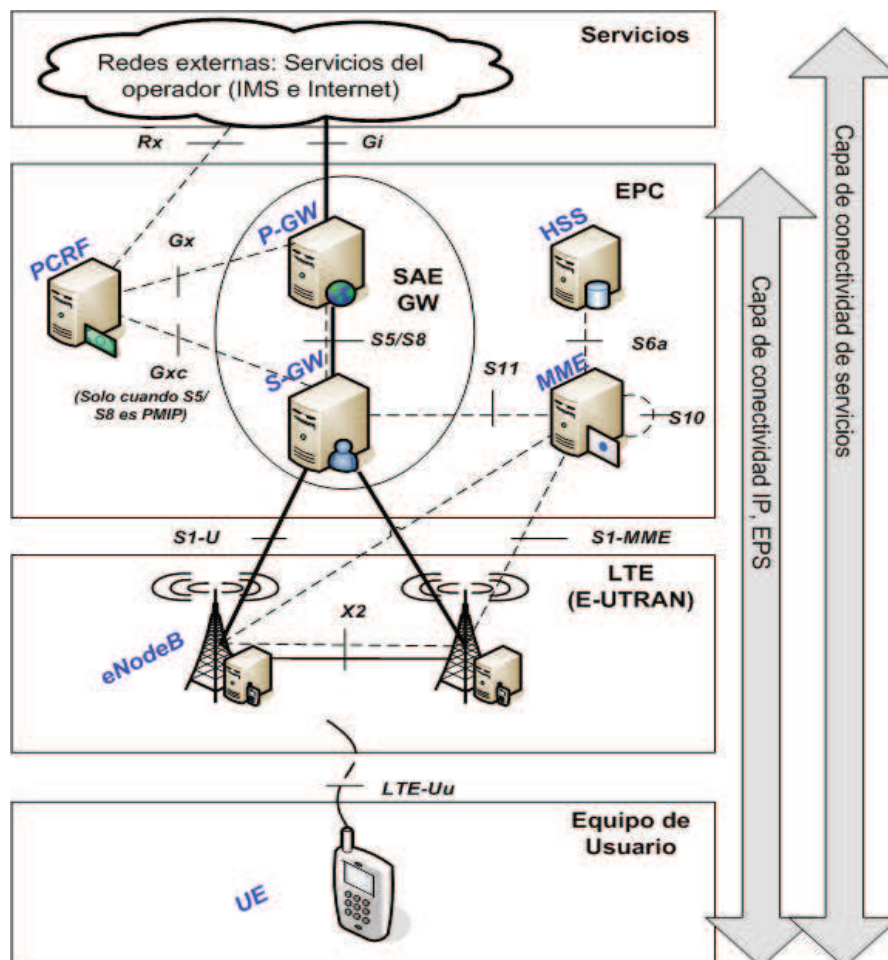


Figura 4.2. Arquitectura general de LTE y LTE-Advanced. ^[3]

A través de la entidad *P-GW* y mediante la interfaz *SGi* se realiza la interconexión de la *EPC* con redes externas o plataformas de servicio *IMS* e *Internet*, esta entidad es el punto de entrada/salida del tráfico hacia/desde el usuario. La entidad *P-GW* se encarga de la asignación de direcciones *IP* a los equipos de usuario y realiza el control de *QoS* de las sesiones de datos establecidas. *P-GW* se conecta a la *S-GW* mediante la interfaz *S5*, cuando ambas entidades pertenecen al mismo operador; y, mediante la interfaz *S8*, cuando éstas se encuentran en redes de operadores diferentes y se proporciona un servicio de *roaming*.

La entidad de red *PCRF* forma parte del marco funcional para controlar los servicios portadores que ofrece la red *LTE* y *LTE-Advanced*, por ejemplo, activar y determinar los parámetros de QoS asociados a cada servicio portador, así como realizar el control de los mecanismos de tarificación, medición del tráfico de datos transferidos, tiempo transcurrido, etc.

Mediante la interfaz *Gx*, el *PCRF* gestiona funciones que limitan la velocidad de transmisión de los servicios portadores. El *PCRF* también es accesible desde las plataformas de servicios externas como *IMS* mediante la interfaz *Rx*. Dicha interfaz ofrece la funcionalidad de control necesaria para que los servidores de aplicación externos puedan proporcionar información asociada a los servicios finales a los que accede el usuario junto con las características y requerimientos de QoS.

El *MME* se conecta con la entidad *S-GW* a través de la interfaz *S11* y a la entidad *HSS* a través de la interfaz *S6a* para acceder a la información asociada a los usuarios de la red que estén autorizados a establecer conexiones a través de *E-UTRAN*. Las entidades *MME* también pueden comunicarse entre ellas mediante la interfaz *S10*.

Toda la arquitectura de red mencionada anteriormente, tanto para *LTE* como para *LTE-Advanced*, puede separarse en capas de la siguiente manera: la primera capa, tiene que ver con los elementos e interfaces que se encargan de la conectividad *IP*, a esta capa se la denomina Capa de conectividad *IP* y está formada por el bloque *EPC*, *E-UTRAN* y Equipo de Usuario; y la segunda es la Capa de conectividad de servicios y está formada por la Capa de conectividad *IP* más el bloque de Servicios, tal y como lo muestra la Figura 4.2 en la que se describe la arquitectura general de *LTE* y *LTE-Advanced*.

Luego de haber descrito la arquitectura de red tanto de *LTE* como de *LTE-Advanced*, se puede encontrar que la principal diferencia de *LTE* con respecto a *LTE-Advanced* a nivel de arquitectura de red, tiene que ver con los métodos y

procedimientos que se aplican en la red de acceso *E-UTRAN*, más concretamente en aspectos relacionados a nivel de capa física.

LTE usa un ancho de banda fijo en cualquiera de las bandas de operación utilizando dentro de éstas un ancho de banda máximo de 20 MHz, en tanto que *LTE-Advanced* utiliza un ancho de banda que se puede formar de distintas bandas de frecuencia alcanzando 100 MHz con un máximo de 5 componentes de portadora de 20 MHz cada una. El *plus* de *LTE-Advanced* es exactamente la agregación de portadoras que se explicó detalladamente en la sección 3.2.

LTE se enfoca en brindar las mismas condiciones de QoS ya que al trabajar siempre en la misma banda de frecuencia asignada éstas dependen de las condiciones radio y del ambiente en el que se encuentre el equipo de usuario. *LTE-Advanced* cambia este esquema y lo mejora notablemente ya que al tener distintas bandas de frecuencia en diferente lugar del espectro radioeléctrico, se vuelve un sistema completamente inteligente que dependiendo de las circunstancias en las que se encuentre el usuario podrá utilizar subportadoras de distintas bandas para brindar el mejor servicio posible al usuario, como se puede apreciar la calidad de servicio brindada por *LTE-Advanced* es muy superior a la de *LTE*.

De todas maneras el procedimiento que realiza *LTE* no es tan complicado como el que realiza *LTE-Advanced*. *LTE* opera en una sola banda de frecuencia, *LTE-Advanced* puede operar en varias bandas de frecuencia y por lo tanto tiene que determinar las bandas con las mejores características para los diferentes usuarios.

A diferencia de *LTE*, *LTE-Advanced* incorpora en *E-UTRAN* un elemento adicional conocido como *Relay Node*, con funcionalidades similares a las de un *eNB*, permitiendo incrementar la cobertura, el rendimiento y la capacidad de la red.

La Figura 4.3 muestra la topología de red para una arquitectura *relay* usada por *LTE-Advanced*. Como se puede apreciar los elementos que se incorporan en *E-UTRAN* son el *Donor eNB* y el *Relay Node*, la interfaz *X2* sirve de comunicación

entre ambos; de manera similar a la topología de *LTE*, las interfaces que sirven de comunicación entre los distintos elementos se basan en un plano de usuario y un plano de control.

El plano de usuario utiliza la interfaz *S1-U* entre las entidades, *S-GW*, *Donor eNB*, *eNB* y *Relay Node*, por su parte el plano de control utiliza la interfaz *S1-MME*. En la Figura 4.3, la interfaz *S1* representa al plano de usuario y al plano de control en tanto que la interfaz *S11* hace referencia exclusivamente al plano de control entre la entidad *MME* y el *Donor eNB*, finalmente, la interfaz *Un* corresponde a la interfaz aire entre el *Relay Node* y el *Donor eNB*.

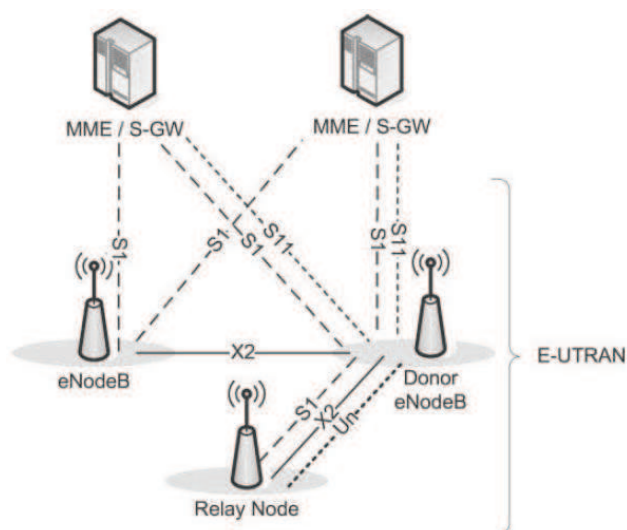


Figura 4.3 Arquitectura *Relay* para *LTE-Advanced* ^[8]

4.3.1 PLANO DE USUARIO Y PLANO DE CONTROL

En *LTE* y *LTE-Advanced* los protocolos para las interfaces de *E-UTRAN* y *EPC* están estructurados en base a un plano de usuario y a un plano de control. El plano de usuario es utilizado para el envío de paquetes *IP* de usuario. El plano de control es utilizado para gestionar y controlar las diferentes interfaces.

La Figura 4.4 muestra los protocolos que se utilizan en el plano de usuario a lo largo de toda la red. En cada interfaz intervienen aquellos protocolos que permiten la comunicación entre las distintas entidades. En *E-UTRAN* el equipo de usuario se comunica con el *eNB* a través de los protocolos *PDCP*, *RLC* y *MAC*, estos

protocolos pertenecen a la capa de enlace y son los únicos diferentes con respecto a los protocolos de las distintas interfaces. Los protocolos *GTP-U*, *UDP*, *IP* y *L1/L2* se utilizan en las interfaces *X2-U*, *S1-U*, *S5/S8* y como se puede apreciar sirven para comunicar el bloque *E-UTRAN* con el bloque *EPC*, también se usan para la comunicación entre las entidades de red que forman el *core*, en este caso el *S-GW* y *P-GW*.

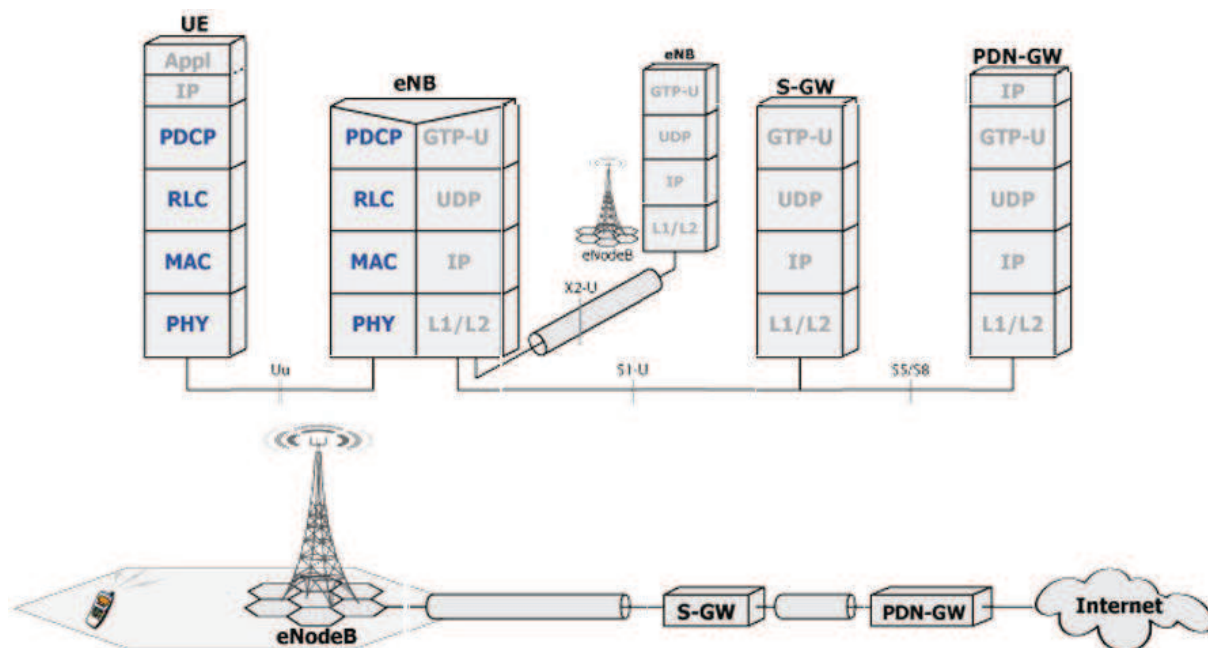


Figura 4.4 Plano de usuario ^[12]

Con respecto al plano de control, la Figura 4.5, muestra la pila de protocolos utilizados para control y señalización de los distintos elementos del sistema *LTE* y *LTE-Advanced*, tanto en *E-UTRAN* como en *EPC*.

A diferencia de la pila de protocolos utilizada en el plano de usuario, en el plano de control aparecen nuevos protocolos, en el *UE* se adicionan el protocolo *NAS* y el protocolo *RRC*, en el *eNB* se adiciona el protocolo *RRC*, para la comunicación entre *eNBs* interviene el protocolo *X2 AP* y el *SCTP*, *S1 AP* se utiliza entre los elementos *eNB* y *MME* a través de la interfaz *S1-MME*; finalmente, el protocolo *GTP-C* utilizado en las entidades de red *S-GW*, *P-GW* y las interfaces *S10*, *S11* y *S5/S8*.

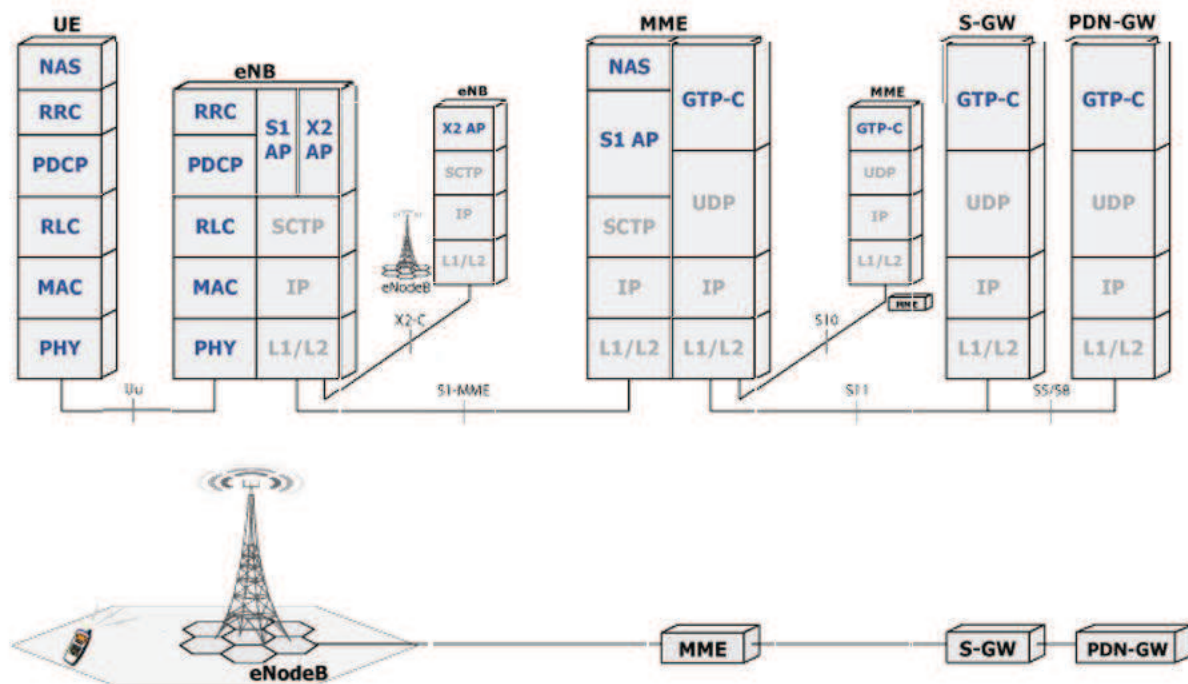


Figura 4.5 Plano de control ^[13]

Al analizar la Figura 4.4 y la Figura 4.5 se puede destacar lo siguiente:

- Los protocolos *PDCP*, *RLC*, *MAC* y *PHY* se utilizan tanto en el plano de usuario como en el plano de control en el *UE* y *eNB*.
- Los paquetes del protocolo *GTP-C* del plano de control se encapsulan en *UDP* e *IP* al igual que los paquetes del protocolo *GTP-U* del plano de usuario.
- El protocolo *NAS* del plano de control establece las reglas de comunicación entre el *UE* y la entidad de red *MME*, es decir, el protocolo *NAS* se encarga de la gestión de movilidad de los equipos de usuario y la gestión de sesiones para la conectividad, dicho de otra manera, a través de este protocolo se puede obtener una gestión de extremo a extremo entre *E-UTRAN* y *EPC*.

- Si se produce un cambio de celda por parte de un usuario, la gestión de este evento se realiza con el protocolo *X2 AP*, ya que con éste se indica al sistema que el usuario se encuentra en un nuevo *eNB*.
- Los protocolos exclusivos del plano de control utilizados para la gestión de sesiones y gestión de movilidad son: *NAS*, *RRC*, *SCTP*, *S1 AP*, *X2 AP* y *GTP-C*.
- En *E-UTRAN* los protocolos del plano de usuario para la comunicación del *UE* con el *eNB* son: *PDCP*, *RLC*, *MAC* y *PHY*; y, para la comunicación entre *E-UTRAN* y *EPC* son: *GTP-U*, *UDP*, *IP* y *L1/L2*, es decir, estos protocolos se usan para la comunicación entre *eNBs* y las entidades de red *S-GW* y *P-GW*.
- Dentro del contexto del plano de control se puede utilizar el protocolo *PMIPv6* en lugar del protocolo *GTP-C* y en el plano de usuario el protocolo *GRE* en vez del protocolo *GTP-U*. Estos protocolos son aplicables para la interfaz *S5/S8*.

Anteriormente en la sección 4.1 se desarrolló una comparación entre la arquitectura de red de *LTE* y *LTE-Advanced*; y, una diferencia relevante de ambas tecnologías era la introducción de una topología *Relay* en el bloque de *E-UTRAN* de *LTE-Advanced*. Ahora en la Figura 4.6 y la Figura 4.7 se muestran la pila de protocolos utilizada para los diferentes elementos que forman parte del *relaying*.

Existe una similitud a nivel de protocolos entre el plano de usuario y el plano de control de *LTE* con el de *LTE-Advanced* en la red de acceso (*E-UTRAN*) con la única diferencia que intervienen dos elementos adicionales, el *RN* y el *Donor eNB* que en definitiva cumple con los mismos papeles que un *eNB*.

Dentro de las novedades que hay en *LTE-Advanced*, una de las más importantes es la que tiene que ver con la técnica de agregación de portadoras y es exactamente lo que las Figuras 4.8 y 4.9 muestran. En estas figuras se realiza una comparación en la estructura del plano de usuario a nivel de capa dos en la que se encuentran los protocolos *PDCP*, *RLC* y *MAC*. La principal diferencia entre

LTE y *LTE-Advanced*, tanto para *downlink* como para *uplink*, se encuentra exclusivamente en la capa *MAC*. En *PDCP* y *RLC* el procedimiento es el mismo.

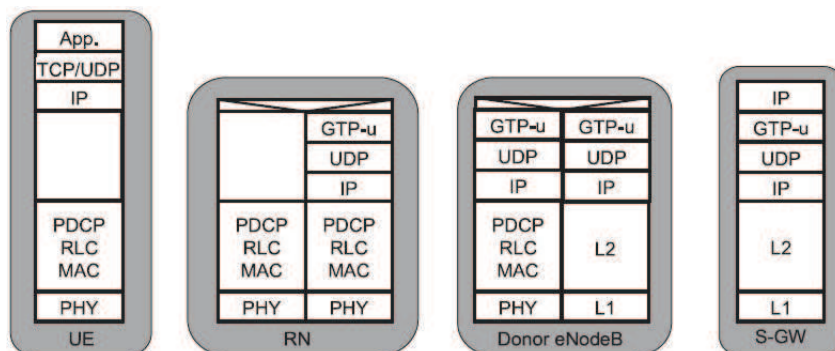


Figura 4.6 Plano de usuario de una topología *Relay* para *LTE-Advanced* ^[14]

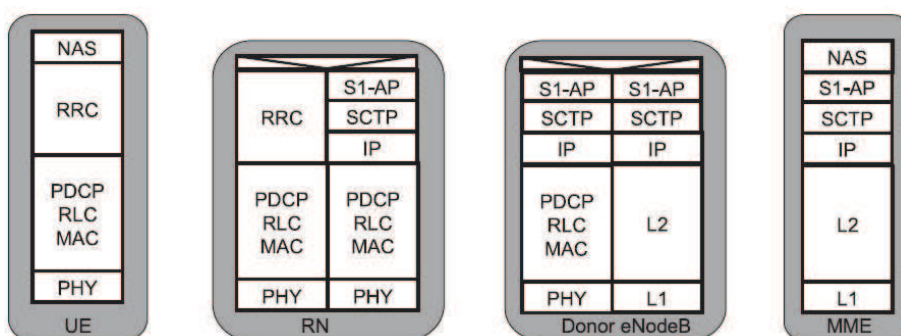


Figura 4.7 Plano de control de una topología *Relay* para *LTE-Advanced* ^[14]

En las Figuras 4.8 y 4.9, *downlink* y *uplink* respectivamente, se puede apreciar que en *LTE-Advanced* la información puede transmitirse en varias componentes de portadora (*CCs*) y por lo tanto en la capa *MAC* se hace uso de un bloque independiente de *HARQ* por *CC* para cada *UE*; a diferencia de lo que sucede en *LTE*, en dónde se utiliza una única *CC* y se trabaja con un solo bloque de *HARQ* para cada *UE*.

Con respecto a la estructura del plano de control no hay diferencia entre *LTE* y *LTE-Advanced*. Después del establecimiento de una conexión *RRC*, la configuración y activación de componentes de portadora se lleva a cabo mediante señalización dedicada.

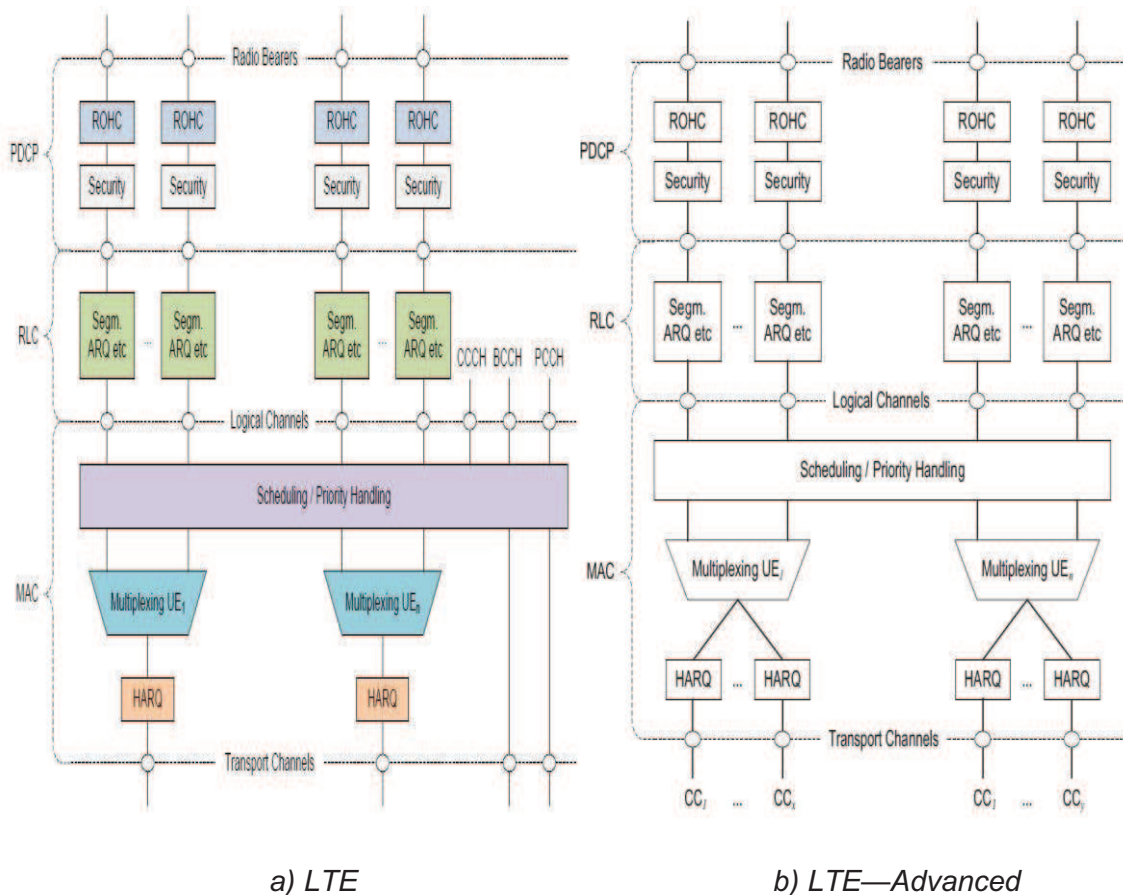


Figura 4.8 Plano de usuario de *LTE* y *LTE-Advanced* para el *downlink* ^[8]

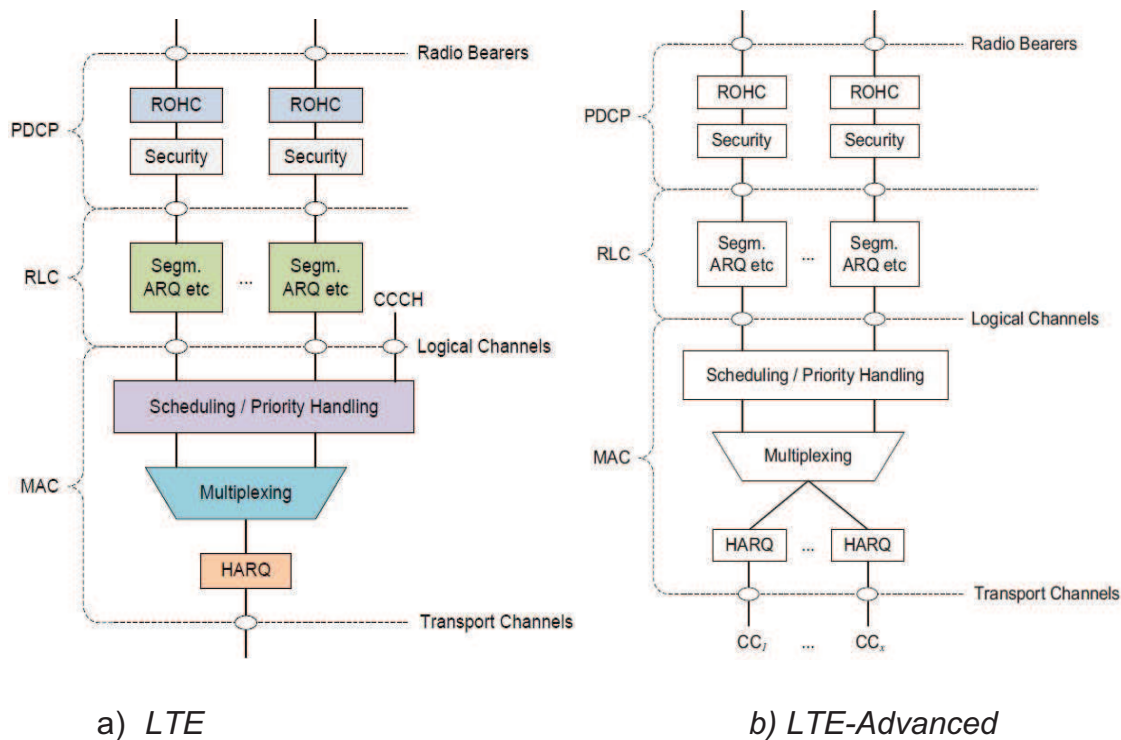


Figura 4.9 Plano de usuario de *LTE* y *LTE-Advanced* para el *uplink*. ^[8]

4.4 COMPARACIÓN DE LA CAPA FÍSICA ^{[1], [8], [15]}

LTE y *LTE-Advanced* basándose en el esquema de multiplexación propuesto por *OFDM* utilizan *OFDMA* como método de acceso para la comunicación en el *downlink*.

La Figura 4.10 muestra esquemáticamente el funcionamiento de *OFDM*; a modo de ejemplo, el flujo de bits que se pretende transmitir ha sido separado en grupos de dos, estos bits ingresan a un bloque de modulación que en este caso es *QPSK* para luego ingresar a un bloque conversor de serie a paralelo. Los símbolos transmitidos, 4 para este ejemplo, se mezclan con las subportadoras ajustando su fase y amplitud; de acuerdo a *LTE* y a *LTE-Advanced* el espaciamiento entre subportadoras es igual a 15 KHz, por lo que en la figura se muestran subportadoras con frecuencias de 0, 15, 30 y 45 KHz, de esta manera se conforman cuatro formas de onda cuyas amplitudes y fases representan a las 4 parejas de bits transmitidas, sumando estas formas de onda se obtiene una única forma de onda en el dominio del tiempo la cual representa a la señal que se desea transmitir, finalmente esta señal se mezcla con una señal de radiofrecuencia para su transmisión.

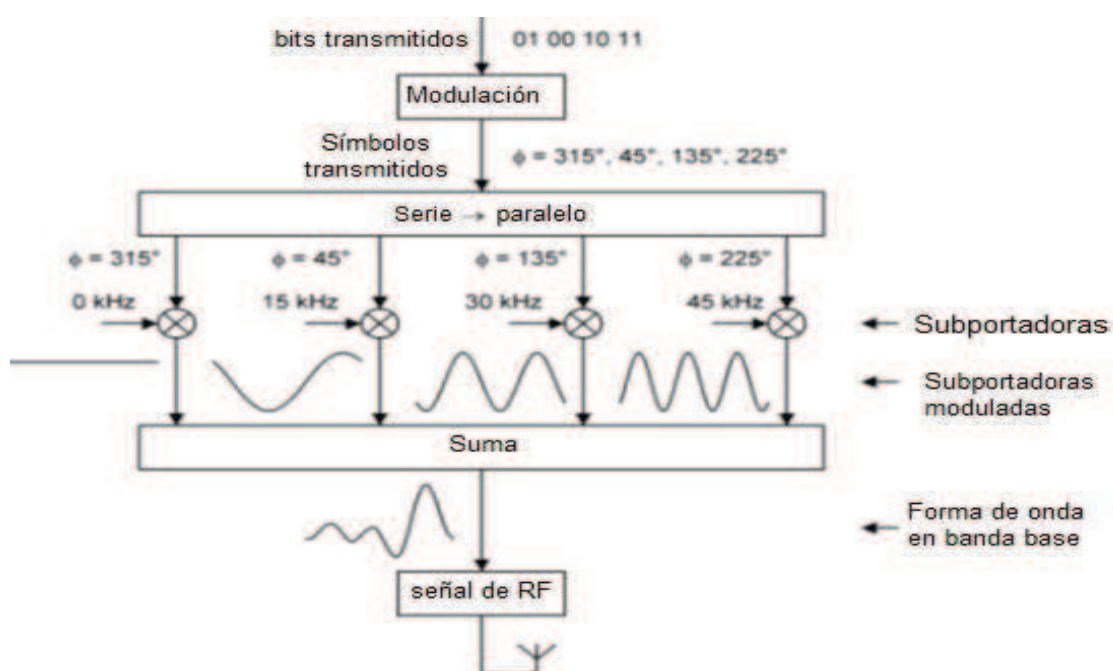


Figura 4.10 Esquema de transmisión *OFDM*. ^[1]

Por su parte la Figura 4.11 muestra el esquema de transmisión *OFDMA* utilizado por *LTE* y *LTE-Advanced* en base a un diagrama de bloques. En esta figura el transmisor es el *eNB* y como se puede apreciar está brindando servicio a tres *UEs*, los bits de los diferentes usuarios ingresan a un bloque de modulación y pasan a través de un conversor de serie a paralelo, de forma similar a lo que se observa en la Figura 4.10, después de la asignación de recursos que se realiza para cada usuario, en base al número de subportadoras se procede con el bloque de *Inverse FFT* el cual permite crear una forma de onda digital en el dominio del tiempo, luego se puede convertir la forma de onda digital a una forma de onda analógica, filtrarla y mezclarla con una frecuencia de radio para su transmisión.

Dos puntos son importantes en este proceso:

- En la conversión de serie a paralelo, los datos representan la amplitud y fase de cada subportadora como una función de la frecuencia.
- Después de la etapa de adición, los datos representan las componentes de fase y cuadratura de la señal transmitida como una función del tiempo, esto se logra en base a una técnica computacional conocida como *Inverse FFT*, la cual convierte señales en el dominio de la frecuencia al dominio del tiempo.

En el caso del receptor, que para el ejemplo es el *UE1*, el procedimiento para recibir los datos es el opuesto al que se detalló para el *eNB*, de todas maneras la Figura 4.11 muestra claramente el procedimiento a seguir. Una vez que la señal se ha muestreado, filtrado y convertido a una señal en banda base, esta nueva señal pasa a través del bloque *Forward FFT* para que se transforme al dominio de la frecuencia y de esta manera poder recuperar la amplitud y fase de cada subportadora, finalmente esta información se demodula y se tiene el flujo de bits transmitidos.

Al analizar el diagrama de bloques de la Figura 4.11, el bloque que realmente hace una diferencia al trabajar con *LTE* o con *LTE-Advanced* es el bloque de asignación de recursos (*Resource element mapping*), debido a que en este bloque se asignan las distintas subportadoras a los usuarios dependiendo del tipo de aplicación o servicio que estén utilizando. A modo de ejemplo, es diferente la

asignación de recursos hecha para un usuario que únicamente está usando *VoIP* de alguien que está realizando un *streaming* de video.

En el caso de *LTE* esta asignación de subportadoras depende de la aplicación que se esté utilizando, ya que al disponer de un único ancho de banda, el número de subportadoras va a ser fijo, a diferencia de *LTE-Advanced*, en donde el uso de un mayor ancho de banda, permite un número superior de asignaciones de subportadoras para los usuarios, y no solo eso, ya que *LTE-Advanced* puede utilizar subportadoras ubicadas en distintas bandas de frecuencia, lo que resultaría en una asignación de subportadoras basadas en la calidad de transmisión, ya que se pueden alternar las subportadoras dependiendo de las condiciones radio y la ubicación del usuario dentro de la celda.

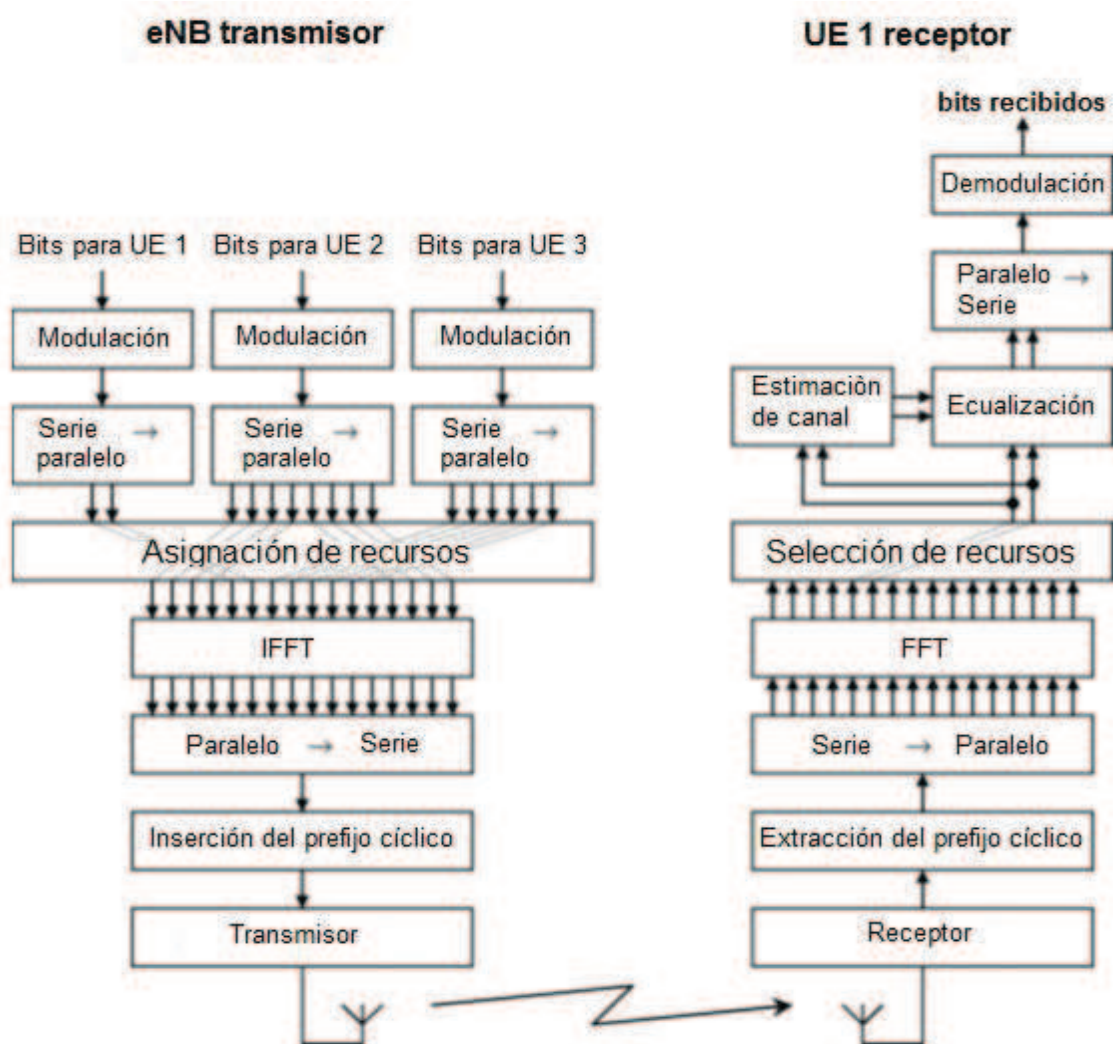


Figura 4.11 Esquema de transmisión OFDMA. ^[1]

En *LTE* y *LTE-Advanced* el uso de *OFDMA* permite reducir la interferencia inter símbolo transmitiendo los datos sobre múltiples subportadoras, sin embargo por las condiciones del canal radio y por los efectos que pueden sufrir las señales al viajar por el espacio como la propagación multicamino y el desvanecimiento de la señal, el uso de un prefijo cíclico ayuda a contrarrestar estos problemas permitiendo que el receptor evite errores en la lectura de los datos recibidos.

En el *uplink*, la técnica de acceso múltiple difiere ya que *LTE* utiliza *SC-FDMA*, en tanto que *LTE-Advanced* gracias a la agregación de portadoras utiliza *clustered SC-FDMA*, es decir, *LTE* versión 8 utiliza *SC-FDMA* en sistemas de portadora única en tanto que *LTE* versión 10 basándose en *SC-FDMA* utiliza una técnica mejorada llamada *clustered SC-FDMA* también conocida como *DFT-S-OFDM* para sistemas multiportadora. *DFT-S-OFDM* se diferencia de *SC-FDMA* en que permite el uso de grupos de subportadoras no contiguas que pertenecen a distintas componentes de portadora.

En la versión 8 sólo se transmiten subportadoras consecutivas, lo que permite obtener un reducido *PAPR* de la señal transmitida y consecuentemente el uso de amplificadores de potencia más eficientes.

En *LTE-Advanced* gracias a *clustered SC-FDMA* ya no se restringe el uso de subportadoras contiguas, pudiéndose asignar grupos de subportadoras, esto permite una planificación selectiva de frecuencia y por lo tanto un incremento en el rendimiento del enlace, sin embargo el *PAPR* de la señal transmitida se incrementa comparado con el esquema usado en *LTE*.

A continuación en la Figura 4.12 se muestra un diagrama de bloques en dónde se puede apreciar el funcionamiento de *SC-FDMA* y *clustered SC-FDMA* para el *uplink* de *LTE* y *LTE-Advanced* respectivamente. El proceso es similar al descrito anteriormente para *OFDMA*, tanto para transmisión como para recepción, teniendo en cuenta que en este caso el *UE* es el transmisor y el *eNB* el receptor.

Los símbolos en el dominio del tiempo son convertidos al dominio de la frecuencia usando la transformada discreta de *Fourier* (*Forward FFT*), una vez en el dominio de la frecuencia, son asignados en una ubicación en el ancho de banda del canal antes de ser convertidos de nuevo al dominio del tiempo usando la *Inverse FFT*,

finalmente el prefijo cíclico es insertado. En recepción la demodulación se produce de manera inversa.

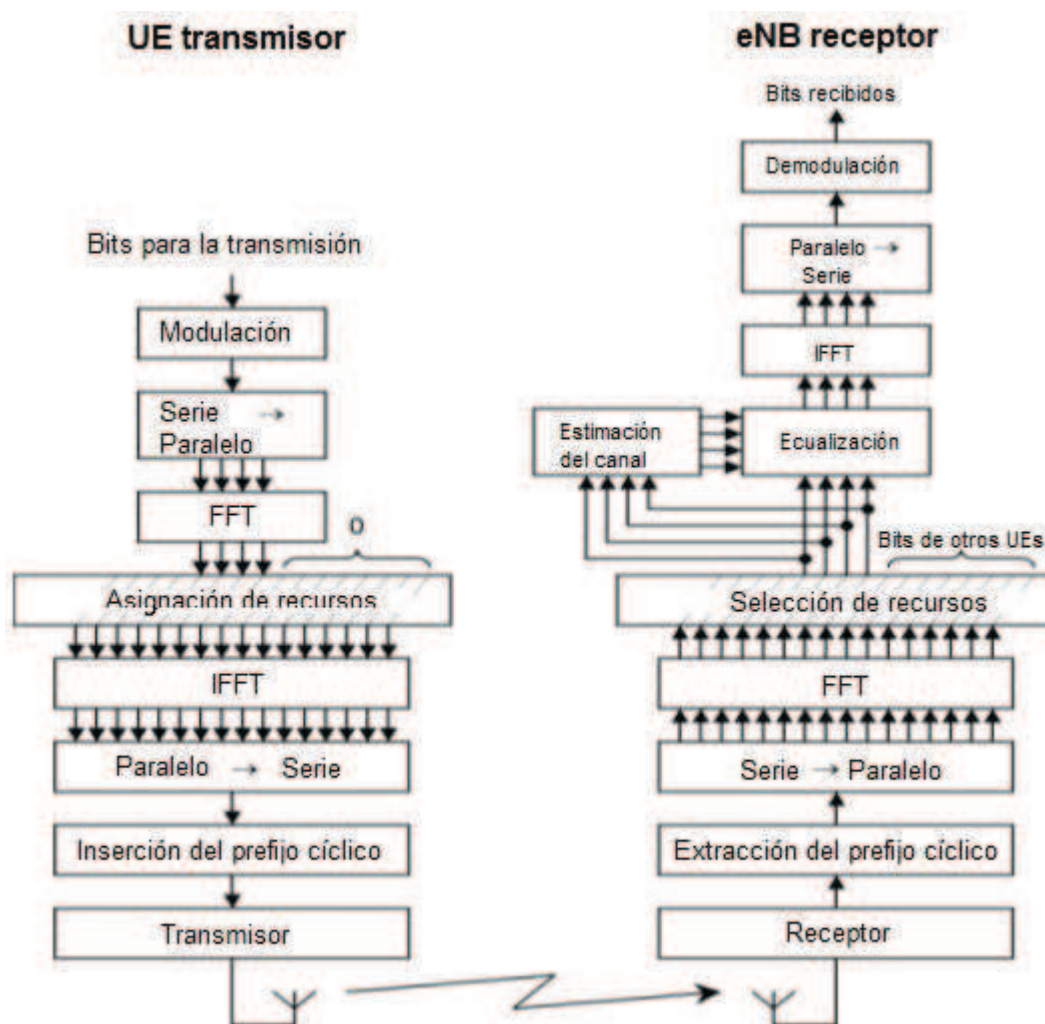


Figura 4.12 Esquema de transmisión SC-FDMA. ^[1]

Una vez más la diferencia de *LTE* con *LTE-Advanced* entre los distintos esquemas de acceso, es decir *SC-FDMA* y *clustered SC-FDMA*, tiene que ver con la asignación de recursos. Para *LTE* esta asignación se hace en base a una sola componente de portadora, en tanto que en *LTE-Advanced* esta asignación se realiza en base a múltiples componentes de portadora, en otras palabras la ventaja de *LTE-Advanced* con respecto a *LTE* es el uso de la técnica de agregación de portadoras.

La Figura 4.13 muestra los distintos esquemas de transmisión utilizados y las posibles combinaciones que se pueden tener cuando se usan canales *PUCCH* y *PUSCH* en el *uplink* de *LTE* y *LTE-Advanced*. A diferencia de *LTE* versión 8, en *LTE-Advanced* es posible la transmisión simultánea de los canales *PUCCH* y *PUSCH*.

Los esquemas de modulación utilizados por ambas tecnologías son: *QPSK*, *16QAM* y *64QAM*.

LTE versión 8 utiliza anchos de banda escalables de 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz con el uso de una única portadora, donde 20 MHz es el ancho de banda máximo que puede tener *LTE*. Por su parte *LTE-Advanced* utiliza agregación de portadoras lo que implica un ancho de banda máximo de 100 MHz utilizando hasta cinco componentes de portadora con un máximo de 20 MHz cada una. Al igual que *LTE*, en *LTE-Advanced* cada componente de portadora puede tener anchos de banda escalables, es decir, *LTE-Advanced* puede soportar una variedad de arreglos distintos de componentes de portadora.

Tanto en *LTE* como en *LTE-Advanced* el mínimo elemento de información que se puede asignar es un *PRB* de 0.5 ms de duración con un ancho de banda de 180 KHz. Cada *PRB* tiene 12 subportadoras equiespaciadas 15 KHz entre ellas con 6 o 7 símbolos *OFDM* o dicho de otra manera un *PRB* tiene un total de 84 recursos disponibles en donde se pueden ubicar símbolos *QPSK*, *16QAM* o *64QAM*. La asignación del número de *PRBs* depende del ancho de banda que se utilice por componente de portadora. A modo de ejemplo, en *LTE* se tienen 6, 15, 25, 50, 75 y 100 *PRBs* para anchos de banda de 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz respectivamente.

El tiempo de duración de una trama en *LTE* y *LTE-Advanced* es de 10 ms y en ambas tecnologías es aplicable el uso de tramas tipo 1 para *FDD* tanto para *uplink* como para *downlink*; y, tramas tipo 2 para operación en modo *TDD*.

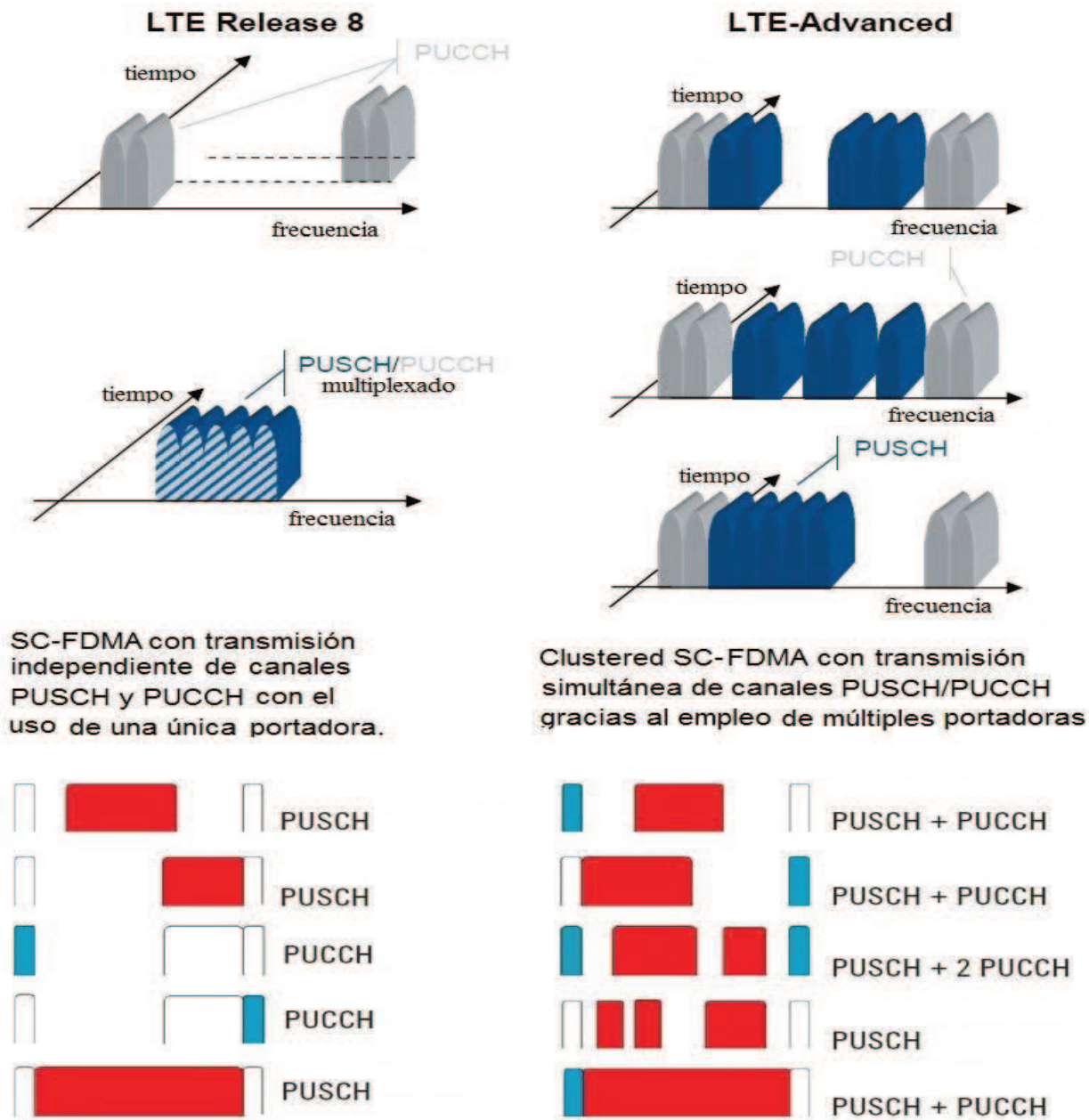


Figura 4.13. Esquemas de transmisión y comparación de canales en el *uplink* de *LTE* y *LTE-Advanced*.^[11]

4.5 COMPARACIÓN DE LOS ESQUEMAS DE MODULACIÓN^[1]

Los esquemas de modulación empleados por *LTE* y *LTE-Advanced* son cuatro en total, éstos son: *BPSK*, *QPSK*, *16QAM* y *64QAM*. En la Figura 4.14 se muestran los respectivos diagramas de constelación de los diferentes esquemas.

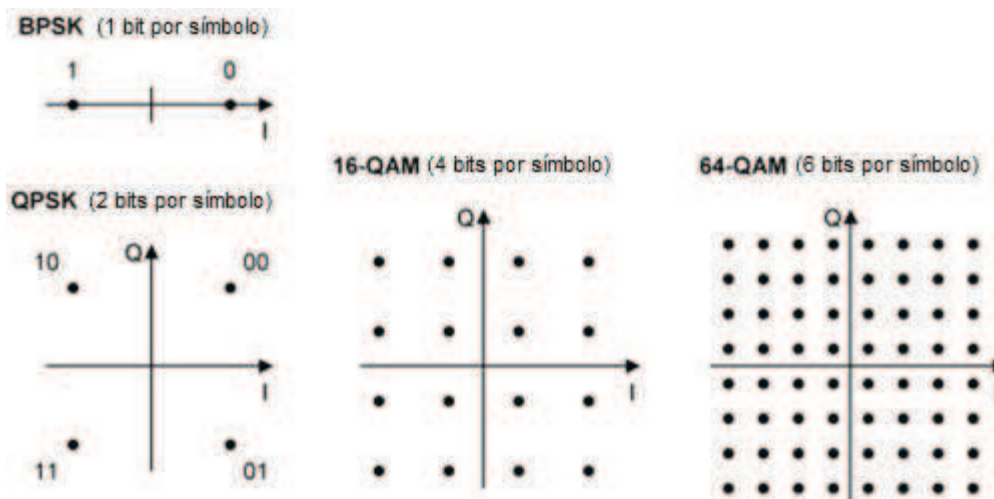


Figura 4.14. Diagramas de constelación de los esquemas de modulación usados por *LTE* y *LTE-Advanced*.^[1]

BPSK envía bits uno a la vez usando dos estados que pueden ser interpretados como fases de 0° y 180° o como señales de amplitud $+1$ y -1 . *LTE* usa este esquema para información de control y no lo usa para transmisiones de datos.

QPSK toma dos bits a la vez y los transmite usando cuatro estados diferentes, éstos tienen fases de 45° , 135° , 225° y 315° los cuales corresponden a combinaciones de bits de 00, 10, 11 y 01 respectivamente. Los cuatro estados de *QPSK* se pueden representar usando un diagrama de constelación, en este diagrama, la distancia de cada estado desde el origen representa la amplitud de la onda transmitida, mientras que el ángulo representa su fase. En la Figura 4.15 se observa el procedimiento llevado a cabo cuando se realiza una modulación *QPSK*.

De manera similar *16QAM* envía cuatro bits a la vez usando 16 estados de diferentes amplitudes y fases, en tanto que en *64QAM* se envían seis bits a la vez usando 64 estados diferentes.

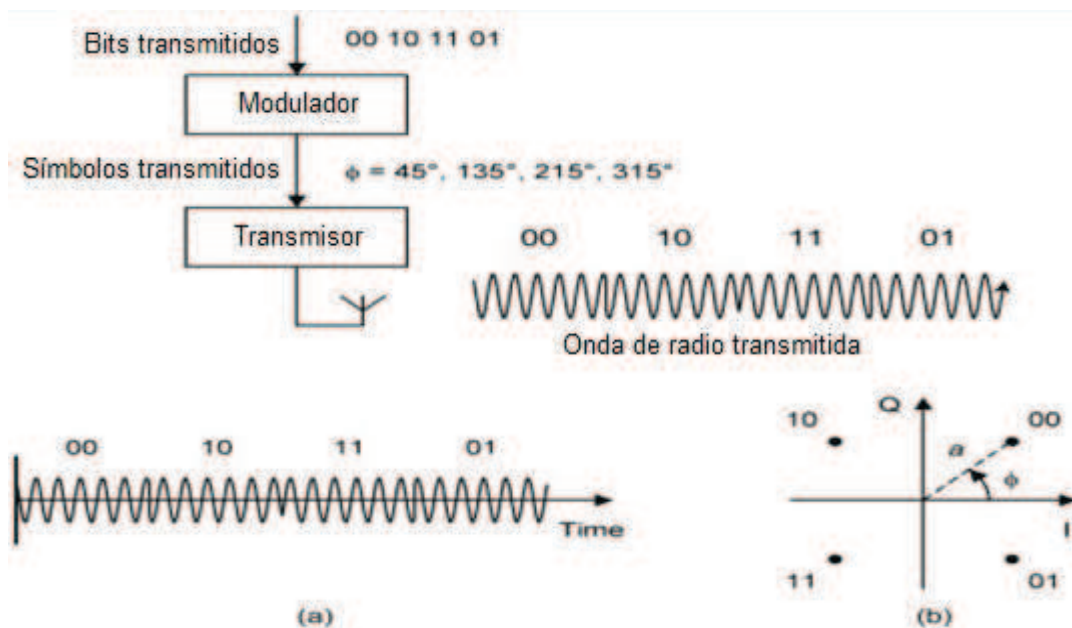


Figura 4.15. (a) Forma de onda QPSK. (b) Diagrama de constelación de QPSK. ^[1]

El uso de diferentes esquemas de modulación depende de los requisitos de QoS asignados a determinados servicios, ya que requerimientos de alta velocidad de transmisión pueden necesitar de modulaciones de mayor orden.

A continuación, la Tabla 4.3 relaciona aspectos muy importantes en el análisis de un esquema de modulación, pero antes de describir cada parámetro utilizado hay que mencionar que la modulación QPSK puede considerarse análoga a la modulación 4QAM²⁹ ya que ambos tipos de modulación cumplen con las mismas características, es decir, la señal digital modula a la portadora variando únicamente la fase de la misma.

Basándose en el diagrama de constelación de cada esquema de modulación se puede ver que el número de vectores que utiliza cada uno depende del número de símbolos que se pueden formar, es por ello que en QPSK hay 4 vectores, en 16QAM, 16 y en 64QAM, 64.

²⁹ El término 4QAM no suele utilizarse comúnmente ya que el término más apropiado es QPSK, de todas maneras los dos términos hacen referencia al mismo esquema de modulación.

	Modulación		
	<i>QPSK</i>	<i>16QAM</i>	<i>64QAM</i>
Número de Vectores	4	16	64
Número de Amplitudes	1	3	9
Número de Fases	4	12	52
Número de Bits por símbolo	2	4	6
Baudios	$V_{tx}/2$	$V_{tx}/4$	$V_{tx}/6$
Eficiencia Espectral teórica [bps/Hz]	2	4	6
BER para SNR en dB	10^{-7} a 12dB	10^{-7} a 16dB	10^{-7} a 20dB

Tabla 4.3. Comparación de los esquemas de modulación.³⁰

Al hablar de una modulación *QAM*, la modulante modula tanto la fase como la amplitud de la portadora, es por ello que dos de los parámetros que se evalúan en la Tabla 4.3 es el número de amplitudes y el número de fases que puede tener el diagrama de constelación. En *QPSK* la portadora tiene una amplitud y 4 fases, en *16QAM* tiene 3 amplitudes y 12 fases y en *64QAM*, 9 amplitudes y 52 fases.

Con respecto al número de bits por símbolo, *QPSK* codifica 2 bits por símbolo, *16QAM* 4 bits por símbolo y *64QAM* 6 bits por símbolo, es decir, la velocidad de modulación expresada en Baudios de *QPSK* es un medio de la velocidad de transmisión, un cuarto en *16QAM* y un sexto en *64QAM*; lo que significa que la velocidad de transmisión con respecto a la de símbolo es el doble en *QPSK*,

³⁰ Tabla realizada por el autor del presente Proyecto de Titulación basándose en la fuente bibliográfica [15].

cuatro veces en *16QAM* y 6 veces en *64QAM*, por lo tanto la velocidad de transmisión está en una relación de m bits con respecto a la velocidad de modulación.

La modulación *64QAM* tiene la eficiencia espectral más alta con respecto a *16QAM* y *QPSK*.

El *BER* es una relación entre el número de bits errados y el número total de bits transmitidos, en la Tabla 4.3 los esquemas de modulación tienen un *BER* de 10^{-7} pero con condiciones señal a ruido diferentes, en el caso de *QPSK*, este valor es de 12dB, en *16QAM* es de 16 dB y en *64QAM* es de 20dB. Es decir que con una modulación *64QAM* con una relación señal/ruido del orden de los 20dB, la señal es 100 veces más potente que el ruido, se consigue demodular sin problemas la información transmitida.

En los diagramas de constelación, hay que tener en cuenta que mientras mayor sea la separación entre los puntos de la constelación, menor será la posibilidad de que un símbolo se convierta en otro por efectos del ruido. La distancia entre los símbolos es muy importante ya que representará la robustez que tiene la modulación frente al ruido. Si los símbolos están más distanciados, será más difícil que uno se convierta en otro por efectos del ruido añadido en el sistema.

Basándose en el análisis descrito anteriormente y en los diferentes parámetros que se han establecido, se puede mencionar que: *QPSK* es el esquema de modulación más robusto frente al ruido con respecto a *16QAM* y *64QAM*, pero a costa de una baja velocidad de transmisión; para una misma velocidad de transmisión el ancho de banda que utiliza *64QAM* es menor que el de *16QAM* y *QPSK*, por último, con modulaciones *64QAM*, la relación señal a ruido debe ser mayor con respecto a esquemas de modulación inferiores para un mismo *BER*.

La Figura 4.16 muestra un claro ejemplo de los esquemas de modulación utilizados en función de la *SNR*. Mientras más cerca se encuentre un terminal móvil de un *eNB* se incrementa la velocidad de transmisión ya que se utiliza un mejor esquema de modulación.

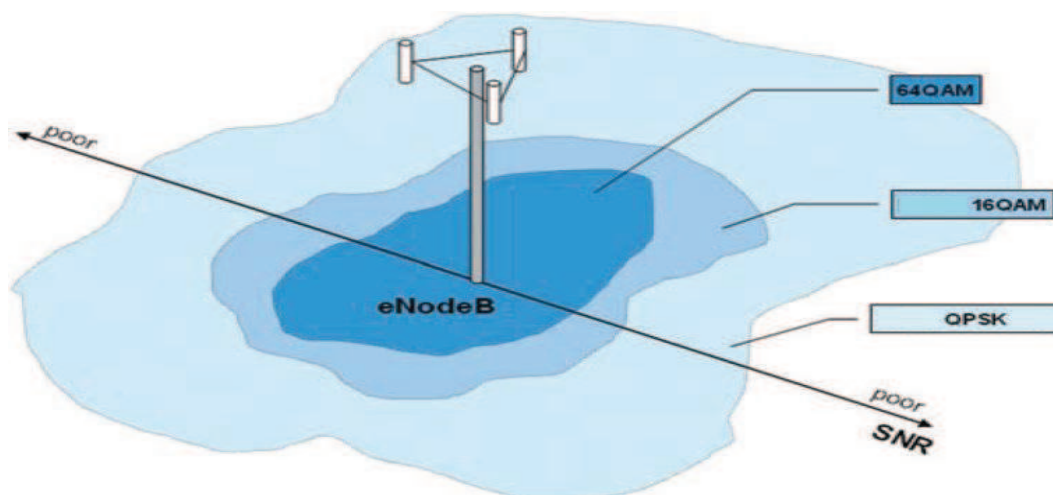


Figura 4.16. Esquemas de modulación utilizados en función de la *SNR*. [2]

Una vez que se han explicado los esquemas de modulación, a continuación se presentan dos tablas, la Tabla 4.4 y la Tabla 4.5, en ellas se puede apreciar los esquemas de modulación utilizados por los diferentes canales físicos tanto para *downlink* como para *uplink* de las dos tecnologías en cuestión, *LTE* y *LTE-Advanced*.

De las tablas se puede destacar que tanto para el enlace *uplink* como para el enlace *downlink* los canales físicos de control utilizan modulación *QPSK*, salvo el canal *PHICH* del *downlink* que utiliza modulación *BPSK* y el canal *PUCCH* del *uplink* que utiliza modulación *BPSK* o *QPSK*. Por su parte los canales físicos de tráfico de ambos enlaces utilizan modulaciones *QPSK*, *16QAM* y *64QAM*. El esquema de modulación que se seleccione va a depender de las condiciones del canal radio en el momento de la transmisión, tanto *LTE* como *LTE-Advanced* utilizarán el mejor esquema.

Canales Físicos en el <i>Downlink</i>	Esquema de modulación
PBCH	QPSK
PDCCH	QPSK
PDSCH	QPSK, 16QAM, 64QAM
PMCH	QPSK, 16QAM, 64QAM
PCFICH	QPSK
PHICH	BPSK

Tabla 4.4 Esquemas de modulación utilizados en los canales físicos del *downlink*.

Canales Físicos en el <i>Uplink</i>	Esquema de modulación
PUCCH	BPSK, QPSK
PUSCH	QPSK, 16QAM, 64QAM

Tabla 4.5 Esquemas de modulación utilizados en los canales físicos del *uplink*.³¹

4.6 COMPARACIÓN DE LA VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN Y LA EFICIENCIA ESPECTRAL ^{[1], [8]}

4.6.1 VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN PICO

La velocidad de transmisión pico alcanzada en *LTE* versión 8 es de aproximadamente 300 Mbps en el *downlink* y de 75 Mbps en el *uplink*, para lo cual se utilizan técnicas *MIMO 4x4* y un ancho de banda de 20MHz.

³¹ La Tabla 4.4 y la Tabla 4.5, han sido elaboradas por el autor del presente Proyecto de Titulación.

Para tener una idea de cómo se alcanzan estas velocidades, se parte de lo siguiente: en el *uplink* se asignan 96 *PRBs*, cada *PRB* tiene una duración de 0.5 ms y transporta 72 símbolos *PUSCH* con lo que se obtiene una tasa de símbolo de 144 Kbaudios (kilo símbolos / segundo), ahora bien, si se utiliza un esquema de modulación de *64QAM*, donde cada símbolo representa 6 bits, la velocidad de transmisión sobre el canal *PUSCH* es de 82.9 Mbps. Tomando en cuenta que esta velocidad depende de muchos factores, por ejemplo la calidad del canal radio, el tipo de despliegue realizado por el operador, la codificación, etc; la velocidad de transmisión alcanzada en el *uplink* bordea los 75 Mbps.

De igual manera se procede con el *downlink*, aquí la tasa de símbolo *PDSCH* por *PRB* es de 136 Kbaudios, asumiendo el uso de cuatro antenas transmisoras, 4 *layers*, 100 *PRBs* y un esquema de modulación de *64QAM*, la velocidad de transmisión pico es de 326.4 Mbps y acatando las mismas restricciones mencionadas en el *uplink*, entonces se obtiene una velocidad pico de 300 Mbps.

El mismo procedimiento de cálculo se utiliza para *LTE-Advanced*. Por lo tanto la velocidad de transmisión pico alcanzada en la versión 10 de *LTE* con dos componentes de portadora de 20 MHz cada una, es decir, un ancho de banda de 40 MHz en total y técnicas de múltiples antenas, *MIMO 8x4* (8 *layers* en el *downlink* y 4 *layers* en el *uplink*), es de 1200 Mbps y 600 Mbps en el *downlink* y *uplink* respectivamente. Con un ancho de banda de 100 MHz, es decir, con el uso de cinco componentes de portadora de 20 MHz cada una, se puede alcanzar una velocidad de transmisión pico de 3000 Mbps en el *downlink* y 1500 Mbps en el *uplink*, pero esto aún no se encuentra especificado en la versión 10 de *LTE*.

4.6.2 VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN PROMEDIO

Las velocidades de transmisión promedio de *LTE* y *LTE-Advanced* son más importantes que los valores teóricos o picos, porque ellas indican una medida real del rendimiento actual de la red y porque pueden ser usadas para estimar la

capacidad requerida de los enlaces del sistema. Estas velocidades son estimadas en base a simulaciones y para ilustrar aquello, en la Figura 4.17 se muestran los resultados que han sido obtenidos por el 3GPP durante el diseño del sistema.

Los resultados de la simulación que se aprecian en la Figura 4.17 están realizados en base a los siguientes parámetros: la estación base se encuentra en un ambiente *outdoor* y el teléfono móvil en un ambiente *indoor*, debido a las paredes del edificio se produce al menos una pérdida de 20 dB en la señal recibida; la frecuencia de portadora es 2 GHz; la distancia entre las estaciones base es de 500 metros en el caso 1 y 1732 metros en el caso 2; la transmisión se realiza en modo *FDD* y el ancho de banda es de 10 MHz.

En resumen, la Figura 4.17 muestra que con un ancho de banda de 10 MHz en una macrocelda la velocidad máxima de transmisión en *LTE* es de aproximadamente 35 Mbps por sector con *MIMO 4x4* para el *downlink* y de 20 Mbps por sector con *MIMO 1x4* para el *uplink*, en tanto que en *LTE-Advanced* se produce un incremento evaluado en aproximadamente 48 y 25 Mbps por sector respectivamente.

A continuación en la Figura 4.18 se presentan los resultados obtenidos en el borde de una macrocelda. Tal y como se puede apreciar en la figura, para *LTE* los valores indican que un *UE* puede obtener una velocidad de transmisión de aproximadamente 1.4 Mbps con *MIMO 4x4* en el *downlink* y de 0.8 Mbps con *SIMO 1x4* en el *uplink*.

Ahora si se compara con los resultados obtenidos en la Figura 4.17 y se asumen 10 usuarios por sector, la velocidad de transmisión promedio por usuario bordearía los 3.5 Mbps en el *downlink* y 2 Mbps en el *uplink*. Finalmente si se combinan los dos resultados se puede establecer que la velocidad de transmisión

promedio en el borde de una macrocelda es aproximadamente el 40% de la velocidad de transmisión promedio.

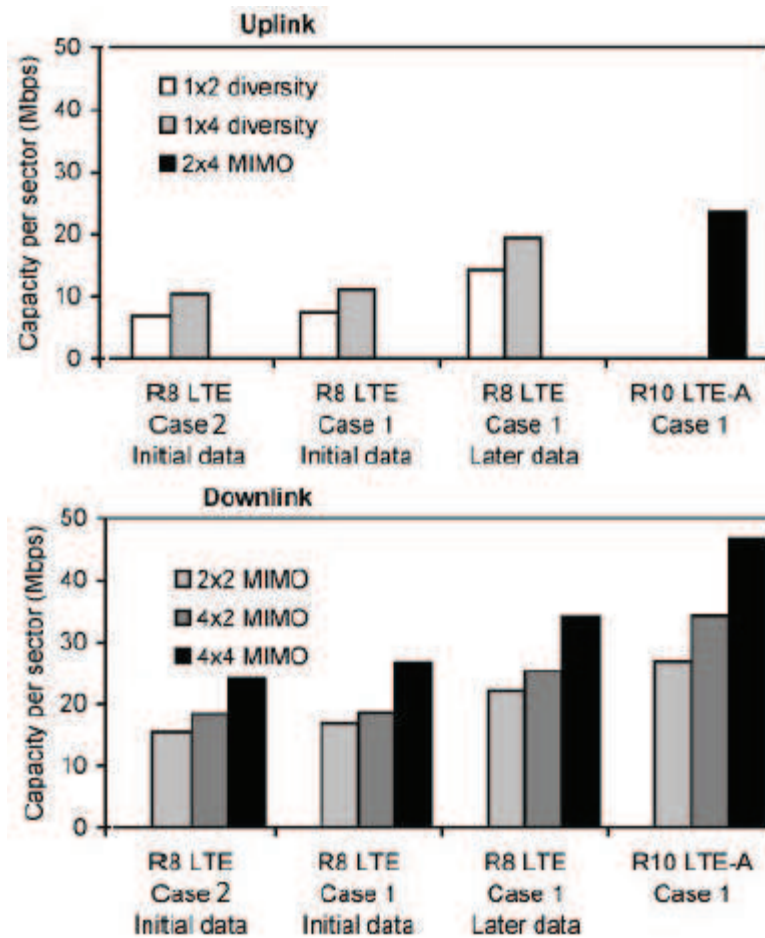


Figura 4.17. Capacidad por sector en una macrocelda con un ancho de banda de 10MHz. ^[1]

Con respecto a *LTE-Advanced*, la Figura 4.17 muestra que la velocidad de transmisión por sector es de 48 Mbps con *MIMO 4x4* para *downlink* y de 25 Mbps con *MIMO 2x4* para *uplink*. Al evaluar la misma configuración en el borde de la celda los resultados mostrados por la Figura 4.18 indican que para el *downlink* la velocidad de transmisión es de 2 Mbps y para el *uplink* es de 1 Mbps. Conforme al resultado de *LTE*, en *LTE-Advanced* sucede exactamente lo mismo, es decir, que la velocidad de transmisión en el borde de la celda es igual al 40 % de la velocidad promedio en condiciones normales.

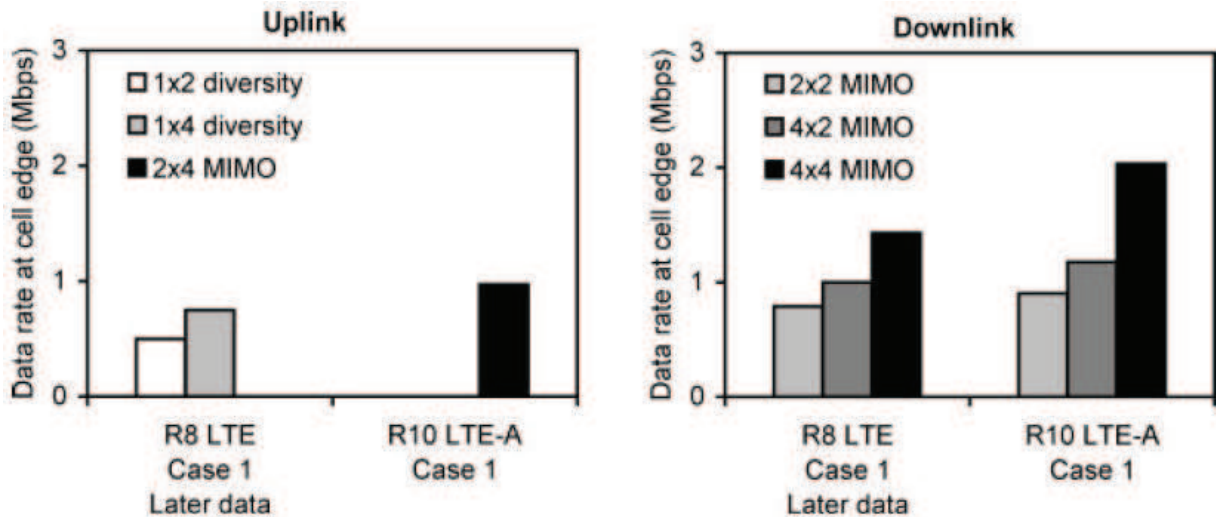


Figura 4.18. Velocidad de transmisión promedio en el borde de una celda por usuario asumiendo 10 usuarios por sector en un ancho de banda de 10 MHz. ^[1]

4.6.3 EFICIENCIA ESPECTRAL PROMEDIO Y EN EL BORDE DE LA CELDA

En las Figuras 4.19 y 4.20 se muestran cuatro escenarios de evaluación, éstos son: *indoor hotspot*, microcelda urbana, macrocelda urbana y macrocelda rural. Para cada uno de estos escenarios se presenta en un diagrama de barras tres mediciones de la eficiencia espectral de una celda, la primera corresponde a *LTE SU-MIMO 4X2*, la segunda a *LTE-Advanced MU-MIMO 4X2* y la tercera corresponde a los requerimientos establecidos por la *ITU-R*.

Para cada enlace existen dos figuras, la primera muestra los resultados obtenidos al evaluar la eficiencia espectral promedio en una celda y la segunda, la eficiencia espectral por usuario en el borde de la celda.

Al analizar las figuras se puede constatar que en el *downlink* de *LTE* la eficiencia espectral promedio y en el borde de la celda sobrepasan los límites impuestos por el *IMT-Advanced*, pero únicamente para los escenarios *indoor hotspot* y rural. Para el caso del *uplink*, *LTE* supera los límites en todos los escenarios.

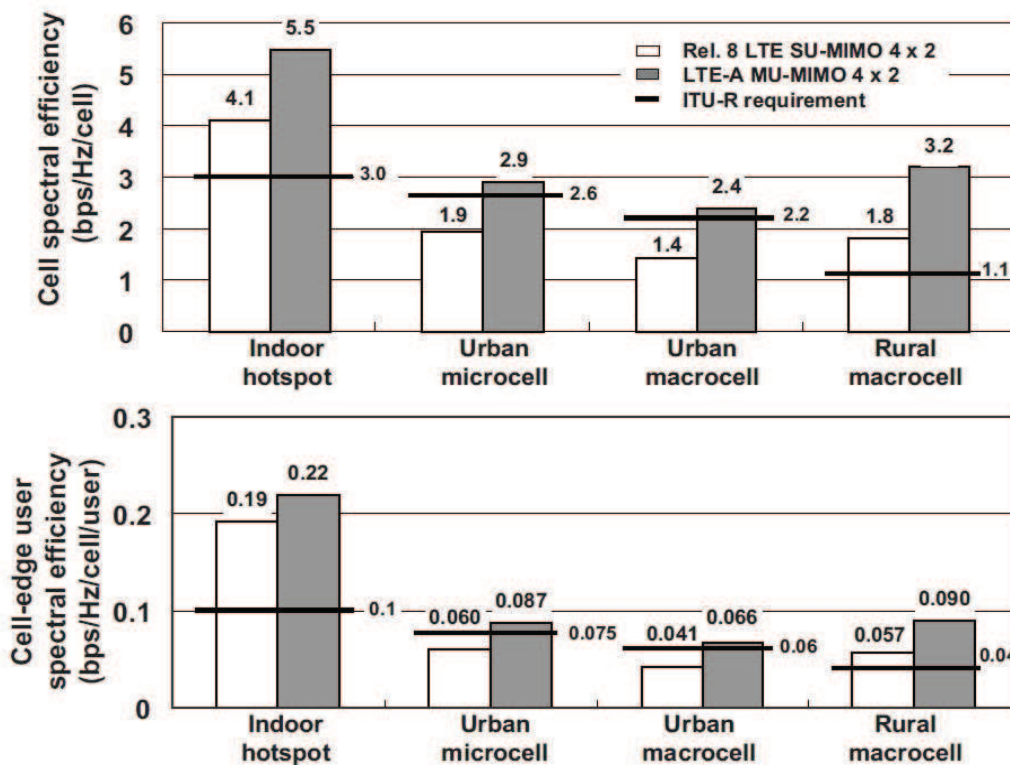


Figura 4.19. Eficiencia espectral promedio y en el borde de la celda para el *downlink* en varios escenarios de acuerdo a la *ITU-R*. [8]

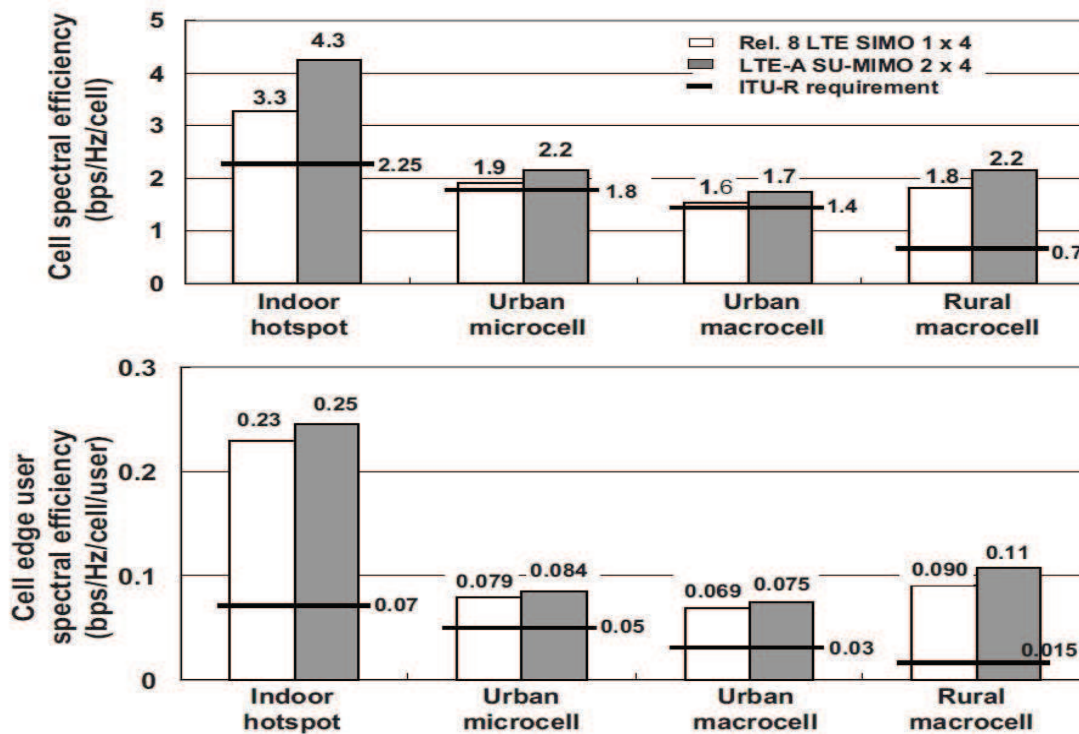


Figura 4.20. Eficiencia espectral promedio y en el borde de la celda para el *uplink* en varios escenarios de acuerdo a la *ITU-R*. [8]

En el caso de *LTE-Advanced*, tanto para *uplink* como para *downlink* los valores obtenidos de la eficiencia espectral promedio y en el borde de la celda son todos superados, lo que otorga a *LTE-Advanced* la mención de tecnología 4G.

4.7 COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE MÚLTIPLES ANTENAS ^{[7], [9]}

Tanto *LTE* como *LTE-Advanced* basan su principio de funcionamiento en técnicas de multiplexación espacial, técnicas de diversidad de transmisión/recepción y técnicas de conformación de haces de radiación. El modo de acceso para el canal radio que usan ambas tecnologías se denomina *MIMO* y existen distintas configuraciones y modos de operación tanto para el *uplink* como para el *downlink* de cada una. Dependiendo de la tecnología en cuestión se puede hablar de *SU-MIMO* y *MU-MIMO* para los diferentes enlaces; y, algo en común a tomar en cuenta es que para ambas tecnologías el número máximo de *codewords* usado es dos.

Con respecto a *LTE*, el *downlink* puede soportar un número máximo de 4 *layers* con uno o dos *codewords* y hasta un total de cuatro puertos de antenas, es decir, en *SU-MIMO* la configuración ideal sería 4x4, tanto para el *eNB* como para el *UE*, pero esto es complicado desde el punto de vista de implementación en el equipo móvil ya que las características de éste serían modificadas notablemente, sin embargo no se descarta la posibilidad de ser implementado. La Tabla 4.6 muestra las distintas configuraciones de antenas para *SU-MIMO* en el *downlink*.

MIMO	1 LAYER	2 LAYERS	3 LAYERS	4 LAYERS	CODEWORD
2x1	SI	NO	NO	NO	Un <i>codeword</i>
2x2	SI	SI	NO	NO	2 <i>layers</i> con dos <i>codewords</i>
4x2	SI	SI	NO	NO	2 <i>layers</i> con dos <i>codewords</i>
4x4	SI	SI	SI	SI	2-4 <i>layers</i> con dos <i>codewords</i>

Tabla 4.6. Configuraciones *SU-MIMO* para el *downlink* de *LTE*. ^[7]

También es posible optar por *MU-MIMO* 4x4, en este tipo de arreglo existen dos opciones en donde lo común es que cuatro antenas estén localizadas en el *eNB*. Mientras que en la primera opción, de las cuatro antenas, dos se encuentran en un *UE* y dos en otro *UE* diferente, en la segunda, cada *UE* dispone de una única antena.

En el *uplink* de la versión 8 de *LTE*, *SU-MIMO* no se encuentra especificado. Con respecto a *MU-MIMO* el *eNB* puede soportar diversidad de recepción con dos o cuatro antenas mientras que los *UEs* tienen una sola antena o máximo dos, presentándose las siguientes combinaciones: *MU-MIMO* 4x4 y *MU-MIMO* 4x2.

LTE-Advanced está basado en esquemas *MIMO* 8x8 en el *downlink* y *MIMO* 4x4 en el *uplink*. A diferencia de *LTE*, en *LTE-Advanced* se introduce por primera vez *SU-MIMO* con un número máximo de 4 antenas en el *UE*.

En *LTE* existen 7 modos de transmisión basados en técnicas de múltiples antenas para el *downlink*; en *LTE-Advanced* se incrementan a nueve, siendo el fundamental el *TM9* para *MIMO* 8x8. Con respecto al *uplink*, *LTE* trabaja con el *TM1* en tanto que *LTE-Advanced* utiliza el modo *TM2* para operar con *MIMO* 4x4. Los distintos modos de transmisión difieren en el número de *layers*, número de puertos de antena, tipo de señales de referencia y el tipo de precodificación empleado.

En la Figura 4.21 se puede apreciar que en *LTE* las señales *CRS* se adicionan después de la precodificación, mientras que en *LTE-Advanced* sucede lo contrario, es decir, las señales *DM-RSs* se adicionan antes del bloque de precodificación. En *LTE* se adicionan antes porque las señales de referencia que se utilizan indican los parámetros establecidos por la celda, entonces sería innecesario precodificar estas señales dado que el *UE* ya conoce de antemano las condiciones de la celda en la que se encuentra. En *LTE-Advanced* sucede lo

contrario, aquí las señales de referencia sí se precodifican porque son específicas de un *UE* y por lo tanto van acompañadas con el flujo de datos correspondiente a cada usuario.

Las señales de referencia utilizadas por *LTE* para el *downlink* son las *CRSs*, en *LTE-Advanced* se aumentan dos *RSs* más, éstas son: *DM-RS* y *CSI-RS*. En el *uplink*, tanto *LTE* como *LTE-Advanced* utilizan las señales *DM-RS* y *SRS* como señales de referencia.

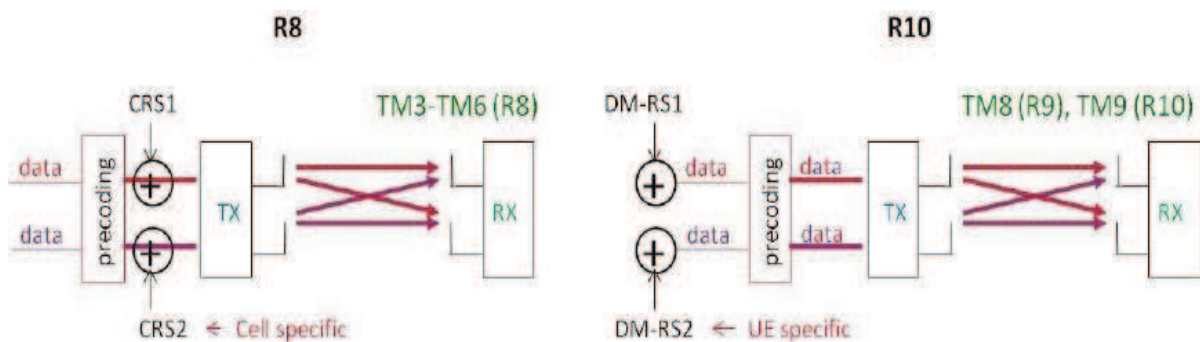


Figura 4.21. MIMO downlink, precodificación y señales de referencia en R8 y R10. ^[9]

4.8 COMPARACIÓN DE CATEGORÍAS DE EQUIPO DE USUARIO

[8], [10]

En la Figura 4.22 se puede apreciar las categorías de equipo de usuario tanto para *LTE* como para *LTE-Advanced*. Con respecto a *LTE* versión 8 se puede apreciar que los valores mostrados están especificados para un ancho de banda de 20 MHz y que existen 5 categorías de terminales con sus correspondientes velocidades de transmisión pico en los distintos enlaces. También se especifican los esquemas de modulación y finalmente para cada categoría se especifican las técnicas de múltiples antenas usadas.

Por su parte *LTE-Advanced* añade 3 categorías de terminales más (6, 7 y 8). La categoría 8 combina la agregación de portadoras de 5 componentes de 20 MHz cada una con *MIMO 8x4* soportando velocidades de transmisión pico de 3 Gbps y

1.5 Gbps en el *uplink* y *downlink*, respectivamente. Las velocidades de transmisión pico alcanzadas por las categorías 6 y 7 pueden ser logradas de diferentes maneras, por ejemplo se puede alcanzar una velocidad de transmisión de 300 Mbps con *MIMO 2x2* con dos componentes de portadora de 20 MHz cada una, o utilizando *MIMO 4x4* con una sola componente de portadora de 20MHz.

Las categorías de equipo de usuario de *LTE* son compatibles con las de *LTE-Advanced*, es decir la comunicación se realiza sin ningún inconveniente cuando un usuario que tiene un dispositivo *LTE* quiere comunicarse con otro que tiene un dispositivo *LTE-Advanced*. Por otro lado, los equipos terminales de categorías 6, 7 y 8 también pueden ser usados como terminales de categorías 1 - 5, esto es posible para poder mantener compatibilidad con redes que aún no soportan la versión 10.

LTE-Release 8 User Equipment Categories



Category		1	2	3	4	5
Peak rate Mbps	DL	10	50	100	150	300
	UL	5	25	50	50	75
Capability for physical functionalities						
RF bandwidth		20MHz				
Modulation	DL	QPSK, 16QAM, 64QAM				
	UL	QPSK, 16QAM				QPSK, 16QAM, 64QAM
Multi-antenna						
2 Rx diversity		Assumed in performance requirements.				
2x2 MIMO		Not supported	Mandatory			
4x4 MIMO		Not supported				Mandatory

(a)

Categorías de UE soportados en el Release 10

	UE category		
	6	7	8
Approximate supported downlink data rate (Mbps)	300	300	3000
Approximate supported uplink data rate (Mbps)	50	100	1500
Number of downlink MIMO layers supported	2 or 4	2 or 4	8
Number of uplink MIMO layers supported	1, 2 or 4	1, 2 or 4	4
Support for 64QAM modulation in downlink	✓	✓	✓
Support for 64QAM modulation in uplink	✗	✗	✓

(b)

Figura 4.22. Categorías de equipos de usuario en (a) *LTE Release 8*^[10] y (b) *LTE Release 10*.^[8]

Según estimaciones de la GSA (*Global Mobile Suppliers Association*), el número de dispositivos *LTE* lanzados al mercado se muestran en la Figura 4.23.

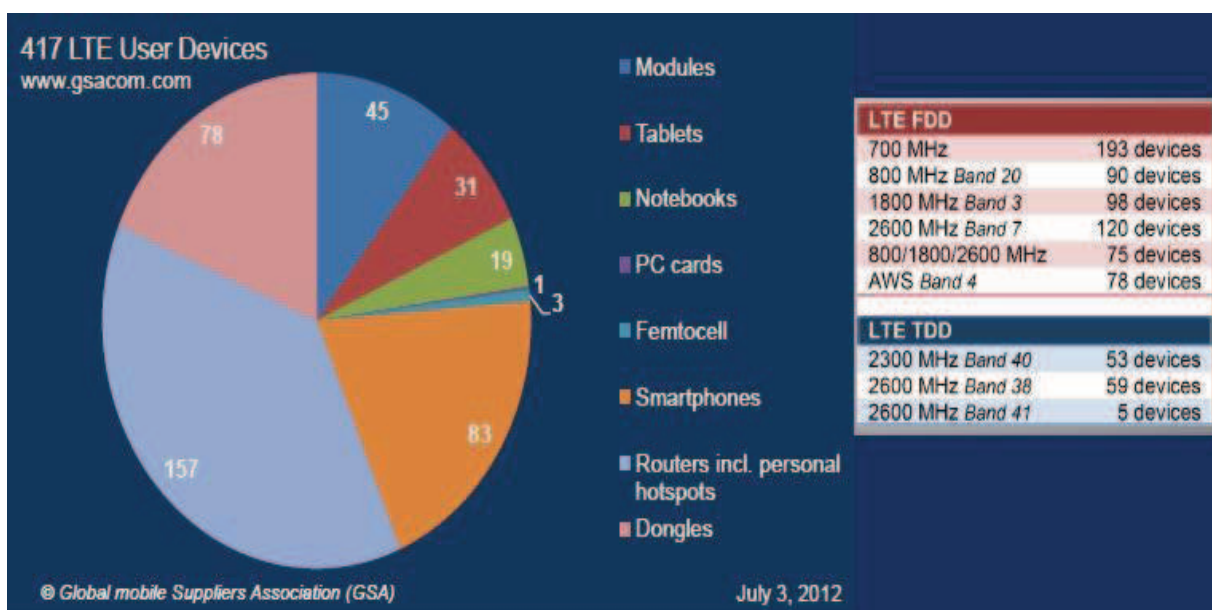


Figura 4.23. Número de equipos de usuario en *LTE*.^[6]

De la figura se puede apreciar que existen 417 dispositivos compatibles con *LTE*, de los cuales, 83 son *smartphones* y 31 *tablets*. También se puede observar que el mayor número de dispositivos opera en las bandas de frecuencia en modo *FDD*.

A modo de ejemplo, los *Smartphones*, *Tablets* y *módems* que actualmente están disponibles en México con la operadora *Telcel* son: el *Samsung Galaxy S3 LTE*, el *Nokia Lumia 900 LTE*, el *Sony Xperia ION*, el *Motorola RAZR HD*, el *Samsung Galaxy S2 LTE*, el *Huawei ASCEND P1 LTE*, la *Samsung Galaxy Tab 10.1* y el módem *Huawei E397BU-501*. En la Figura 4.24 se pueden observar algunos de los dispositivos mencionados.

Con respecto a *LTE-Advanced* aún no existen equipos de usuario disponibles comercialmente, se espera que a finales del 2013 o comienzos del 2014 ya se cuente con móviles que cumplan con las especificaciones de la versión 10. Por ahora no se ha lanzado al mercado ninguno y los fabricantes se encuentran en etapas de prueba.



Figura 4.24. Smartphones 4G LTE.

4.9 COMPARACIÓN DE SERVICIOS Y APLICACIONES

Las redes móviles celulares *LTE* y *LTE-Advanced* se encargan de prestar servicios móviles interactivos a sus usuarios y es por ello que estas redes satisfacen necesidades productivas, comerciales, de entretenimiento y comunicación.

Al realizar una comparación entre las dos tecnologías celulares se puede comprobar que ambas pueden brindar los mismos servicios usando las mismas aplicaciones, entonces, la diferencia está en que tan rápido lo hacen. Con estos argumentos *LTE-Advanced* es la tecnología vencedora ya que sus velocidades de transmisión son muy superiores a las ofrecidas por *LTE*.

En definitiva tanto *LTE* como *LTE-Advanced* soportan y brindan servicios móviles interactivos como los que se presentan a continuación:

- Participación en videoconferencias en tiempo real, sin que la imagen se congele o se corte.
- Transmisión de eventos en vivo y en directo con una excelente calidad de video a través de redes sociales.
- Descargas de grandes archivos en muy poco tiempo, incluyendo contenido multimedia de buena calidad.
- Mantenimiento de comunicación constante en actividades comerciales con empleados que tienen que mantenerse fuera de la oficina y en movimiento.
- Conferencias web en vivo y sin interrupciones.
- Servicios en la nube.

Finalmente la Tabla 4.7 muestra los servicios que pueden ofrecer *LTE* y *LTE-Advanced* en distintos sectores del mercado.

Servicios en <i>LTE</i> y <i>LTE-Advanced</i>		
Sector	Características del servicio	Beneficios
Dispositivos de usuario Aplicaciones y servicios	<ul style="list-style-type: none"> • Mejores prestaciones en los equipos de usuario ya que se mejora el sistema operativo, los protocolos, procesadores, antenas, baterías, pantallas touch, etc. • Plataformas abiertas para nuevas aplicaciones con contenido multimedia. 	<p>Aplicabilidad en varios segmentos de mercado.</p>
Internet	<p>Todo lo que contempla la Web: La comunicación, interoperabilidad, el intercambio, la colaboración, amplias bases de datos para los consumidores así como el mercadeo de productos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Redes sociales. • Uso compartido de fotos, video y música. • Acceso a blogs, noticias, chat, juegos, información de viajes, comunidades y grupos de interés. • TV por Internet, Streaming de videos y descarga
Navegación y Localización	<ul style="list-style-type: none"> • Servicios de <i>GPS</i> y localización por celda. • Servicios de Información Geográfica • Servicios para almacenar y organizar la información de los usuarios de la red. 	<ul style="list-style-type: none"> • Contenidos basados en localización. • Acceso a información de localización y presencia de contactos. • Compras y apartados de productos desde el terminal móvil. • Acceso móvil a los itinerarios de las Agencias de viajes.

Sector	Características del servicio	Beneficios
Transporte	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de entretenimiento en los automóviles. • Centros de servicio para aplicaciones móviles. • Proveedores de contenidos para servicios de radio y televisión adaptados para el uso en vehículos 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoreo inalámbrico del automóvil. • Actualización automática de las aplicaciones en el automóvil. • Bases de datos de información en tiempo real de la localización y actualizaciones de tráfico. • Pago de peaje con el dispositivo móvil. • Acceso a Internet desde el automóvil.
Bancario	<ul style="list-style-type: none"> • Involucra a bancos, tarjetas de crédito y empresas del Sector Financiero. • Máquinas expendedoras. • Sistemas de acceso para la seguridad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Transacciones bancarias por Internet móvil y comercio electrónico. • Pago de entradas, productos de máquinas expendedoras y transporte público por medio del terminal móvil.
Salud	<ul style="list-style-type: none"> • Bases de datos de centros odontológicos, hospitales e Institutos de Seguros. • Dispositivos de control. • Información del resultado de exámenes médicos a través de páginas web. 	<ul style="list-style-type: none"> • Acceso móvil a información de salud. • Acceso a base de datos personales: historia clínica, radiografías, etc. • Diagnóstico remoto con soporte de video. • Acceso a consejería médica en línea tanto a nivel nacional como internacional.

Sector	Características del servicio	Beneficios
Periodismo	Incluye periódicos, revistas, emisoras de radio y televisión, blogs, etc.	<ul style="list-style-type: none"> • Acceso a noticias y acontecimientos televisivos en tiempo real. • Acceso a blogs. • Acceso a servidores que almacenan información no reciente.
Seguridad y control	<ul style="list-style-type: none"> • Alarmas para autos y edificios. • Monitoreo y reporte de sistemas de seguridad. • Sistemas de acceso. • Control de sistemas de calefacción y aire acondicionado. • Aplicaciones de seguridad en varios servicios. 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoreo de alta definición y acceso a reportes de alarmas instaladas en edificios. • Almacenamiento y monitoreo en línea de cámaras de seguridad. • Control de equipo de calefacción y aire acondicionado.
Aplicaciones del consumidor	<ul style="list-style-type: none"> • Integración de dispositivos electrónicos de casa, entre ellos: impresoras, electrodomésticos digitales, equipos de audio, televisores, sistemas de vigilancia, consolas de juegos. (<i>Home Gateway</i> en el hogar) • Interconexión del <i>Home Gateway</i> con femtoceldas las cuales permiten mejorar la cobertura de red dentro de la casa. • Lectura de <i>E-books</i> o libros electrónicos. • Acceso a servidores de contenido multimedia y descarga de <i>software</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> • Acceso remoto a los dispositivos conectados a la red. • Acceso desde el terminal móvil a las cámaras de seguridad. • Acceso a información en la nube (<i>Cloud services</i>). • Descarga y acceso a libros en formato electrónico, videos y música.

Tabla 4.7. Servicios que ofrecen *LTE* y *LTE-Advanced*.³²

³² La Tabla 4.6 fue elaborada por el autor del presente Proyecto de Titulación basándose en la fuente bibliográfica [4].

4.10 COMPARACIÓN DE REDES DESPLEGADAS Y LANZAMIENTO COMERCIAL

La Figura 4.25 muestra el panorama completo del despliegue de redes comerciales *LTE* alrededor del mundo. De acuerdo a los estudios realizados por la GSA existen 360 operadores en 105 países que están invirtiendo en *LTE*, de éstos 308 están comprometidos en 94 países en utilizar la tecnología y 52 se encuentran en versiones de prueba en 11 países.

Concretamente se encuentran desplegadas en el mundo 113 redes comerciales en 51 países y se prevé que a finales del 2013 existan 209 en 75 países. Por ahora ya se ha hecho el lanzamiento de 11 redes *LTE* en operación *TDD* y se estima que el 36% de las redes han sido implementadas en la banda de 1800 MHz.

En la Figura 4.25, el color rojo representa a todos los países que ya cuentan con *LTE*, el color azul a los países a punto de implementar *LTE* y, el celeste a los países que están haciendo pruebas de la tecnología.

La Figura 4.26 ilustra el incremento del número de redes comerciales *LTE* desplegadas en el mundo. Con tan solo dos redes en el 2009 y una proyección de 209 para finales del 2013, se puede apreciar cómo *LTE* va a tener un gran impacto tanto para operadores como para usuarios. Por el momento existen 113 redes comerciales desplegadas en 51 países y 52 redes que aún se encuentran en etapa de prueba.

En cuanto a América Latina se refiere, a continuación se presenta la Tabla 4.8, en la cual se puede apreciar los operadores de cada país que pretenden implementar *LTE* en un futuro no muy lejano y los que ya lo tienen implementado.

De la Tabla 4.8 se puede apreciar que la mayoría de países se encuentran en planificación o en versiones de prueba de la tecnología. En nuestro país, tanto *Claro* como *Movistar* tienen previsto implementar *LTE* en el transcurso del año 2013, *Claro* pretende hacerlo en la banda de los 700 MHz en tanto que *Movistar*

aún no lo especifica. Sin embargo aún no se registran avances por parte de las dos operadoras con respecto a la implementación de *LTE*.

Con respecto a *LTE-Advanced*, esta tecnología aún se encuentra en etapa de prueba y es por ello que en Suecia, el primer país del mundo donde fue implementado *LTE*, ya se realizaron pruebas de *LTE-Advanced*, *Ericsson* logró descargar 700 MB en 9.3 segundos. A nivel de laboratorio, *HUAWEI* mostró velocidades de descarga teóricas de hasta 600 Mbps.

Se espera que el sistema *LTE-Advanced* y los equipos de usuario estén disponibles comercialmente a finales del año 2013 o a inicios del año 2014.

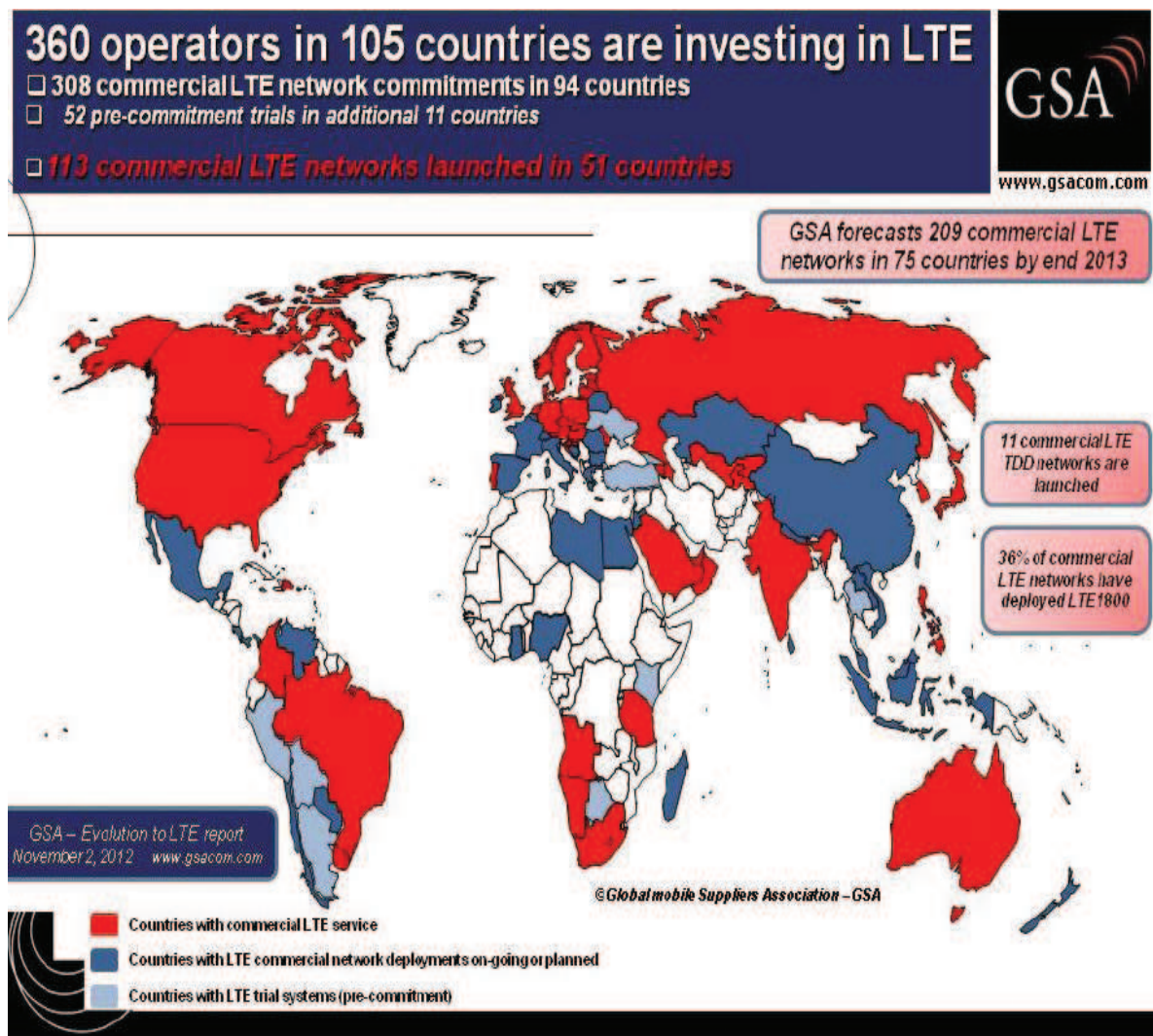


Figura 4.25. Redes *LTE* en el mundo. [6]

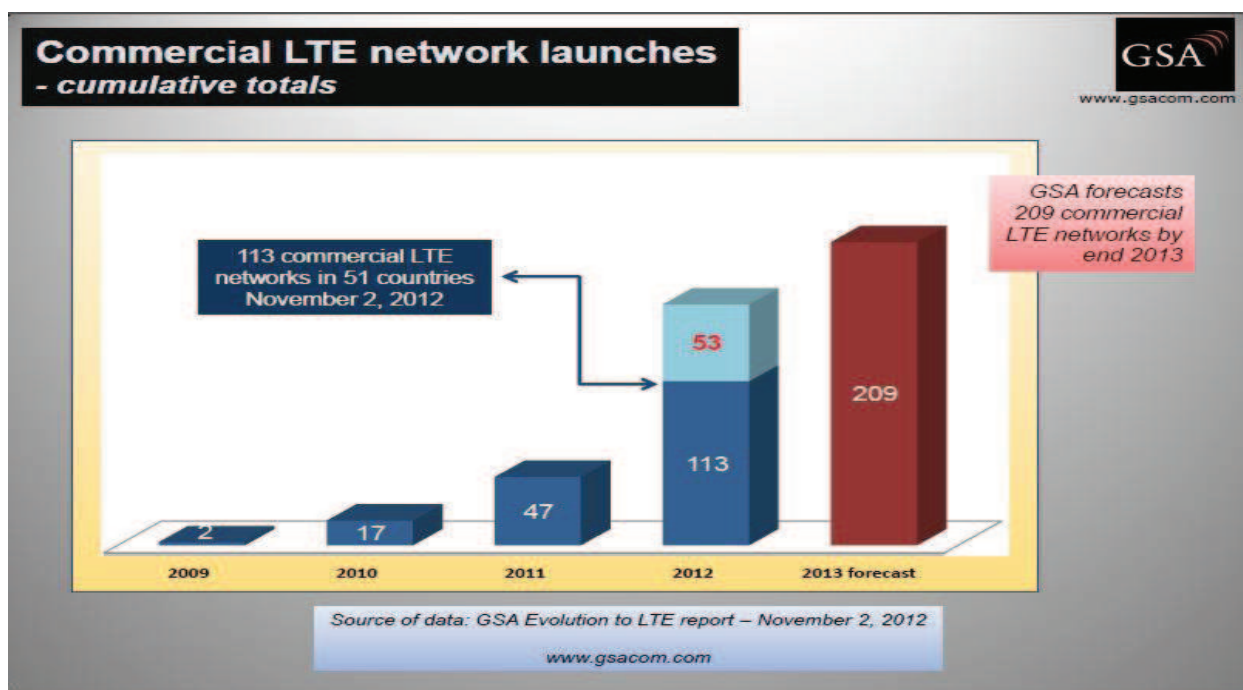


Figura 4.26. Evolución de redes comerciales LTE. ^[6]

País	Operador	Período aproximado de despliegue	Banda LTE
Argentina	Claro	En prueba	2.1 GHz
Argentina	Nextel	En prueba	2.1 GHz
Argentina	Personal	Planificado para el 2014	2.1 GHz
Argentina	Movistar	Planificado para el 2014	1.7 GHz/2.1 GHz
Bolivia	Movil de Entel	En prueba	700 MHz
Brasil	Claro	En servicio desde Dic. 2012	2.6 GHz
Brasil	CTBC Telecom	Planificado	850/1800 MHz
Brasil	Nextel	Planificado	En planificación
Brasil	Oi	Planificado 2013	2.6 GHz
Brasil	Sercomtel Celular	Planificado	En planificación
Brasil	Sky Telecom (Broadband)	En servicio desde Dic. 2011	2.6 GHz TD-LTE
Brasil	TIM Brasil	Planificado 2013	450 MHz
Brasil	Vivo	Planificado Abril 2013	2.1 GHz
Chile	Claro	Planificado 2012	En planificación
Chile	Entel	En prueba	2.6 GHz
Chile	Movistar	Planificado 2012	En planificación
Colombia	Comcel	Planificado	1.9/2.1 GHz
Colombia	Tigo	Planificado	En planificación

País	Operador	Período aproximado de despliegue	Banda LTE
Colombia	Movistar	Planificado	LTE 700
Colombia	UNE (EPM Telecomunicaciones)	En servicio desde Junio 2012	2.6 GHz
Ecuador	Claro	Planificado 2013	700 MHz
Ecuador	Alegro (CDMA)	No existen registros	No existen registros
Ecuador	Movistar	Planificado 2013	En planificación
México	Iusacell / Unefon	Planificado	En planificación
México	Telcel	En servicio desde el 6 de Nov. 2012	1.7/2.1 GHz
México	Nextel		1.7/2.1 GHz
México	Movistar	Planificado para 2012	1.7/2.1 GHz
Paraguay	Claro	Planificado	En planificación
Paraguay	COPACO / VOX	Planificado 2012	En planificación
Paraguay	Personal / Núcleo	Planificado	En planificación
Paraguay	Tigo	Planificado	En planificación
Perú	Claro	Planificado 2013	En planificación
Perú	Nextel	Planificado 2014	En planificación
Perú	Movistar	Planificado 2013	700 MHz
Puerto Rico	AT&T Mobility	En servicio desde Nov. 2011	700 MHz
Puerto Rico	Claro	En servicio desde Dic. 2011	700 MHz
Puerto Rico	Open Mobile	En servicio desde Abril 2012	700 MHz
Puerto Rico	Sprint Nextel Puerto Rico	Planificado	850/1900 MHz
Puerto Rico	T-Mobile	Planificado	En planificación
Uruguay	Antel	En servicio desde Nov. 2011	1.7/2.1 GHz
Uruguay	Claro	Planificado	En planificación
Uruguay	Dedicado (WiMAX)	Planificado	TD-LTE
Uruguay	Movistar	Planificado	En planificación
Venezuela	Digitel	Planificado Dic. 2012	1800 MHz
Venezuela	Movilnet	Planificado 2013	En planificación
Venezuela	Movistar	Planificado 2013	LTE 2100

Tabla 4.8. Operadores en América Latina comprometidos con el despliegue de redes *LTE* (Actualizado Diciembre 2012). ^[5]

REFERENCIAS DEL CAPÍTULO 4

- [1] COX, Christopher. *An introduction to LTE, LTE-ADVANCED, SAE and 4G Mobile Communications*. Editorial WILEY. 2012.
- [2] Rohde & Schwarz España. *LTE (Long Term Evolution): El siguiente nivel*.
- [3] HOLMA, Harri; TOSKALA, Antti. *LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA based radio Access*. Editorial WILEY. 2009.
- [4] MONTEALEGRE Fabián; SALAS Marcelo; ACUÑA Pablo; SALAZAR José Pablo. *Propuesta de requerimientos técnicos para la implementación de redes móviles con la tecnología “Long Term Evolution (LTE)” en Costa Rica*. 2009.
- [5] 4G Americas. *Global 3G and 4G Deployment Status HSPA / HSPA+ / LTE /14 Dec 2012*.
www.4gamericas.org
- [6] HADDEN, Alan. *GSA update LTE Developments Worldwide*. GSA (Global mobile Suppliers Association)
www.gsacom.com
- [7] KOROWAJCZUK, Leonhard. *LTE, WIMAX and WLAN Network Design, Optimization and Performance Analysis*. Editorial WILEY. 2011.
- [8] SESIA, Stefania; TOUFIK, Issam; BAKER, Matthew. *LTE – The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice*. Segunda Edición. Editorial WILEY 2011.
- [9] LTE-Advanced: <http://www.3gpp.org/lte-advanced>
- [10] NAKAMURA, Takehiro. *Proposal for Candidate Radio Interface Technologies for IMT-Advanced Based on LTE Release 10 and Beyond (LTE-Advanced)*. 3GPP TSG-RAN. 2009.
http://www.3gpp.org/IMG/pdf/2009_10_3gpp_IMT.pdf

- [11] Agilent Technologies. Introducing LTE-Advanced. 2011.
<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5990-6706EN.pdf>
- [12] LTE Protocols - User Plane
<http://www.masterlrefaster.com/lte/userplane.php>
- [13] LTE Protocols explained, following the 3GPP structure
<http://www.masterlrefaster.com/lte/controlplane.php>
- [14] SESIA, Stefania; TOUFIK, Issam; BAKER, Matthew. LTE – The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice. Segunda Edición. Editorial WILEY. 2011.
- [15] La Modulación de señales
<http://www.ea1uro.com/eb1dgh/Digitales/Modulaci%F3n/Modulacion.html>

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- *LTE* y *LTE-Advanced* se encuentran estandarizados por el 3GPP en la versión 8 y la versión 10 respectivamente. *LTE-Advanced* no es una nueva tecnología, simplemente añade características significativas a *LTE* que permitirán alcanzar los parámetros establecidos por el *IMT-Advanced* para tecnologías 4G.
- Comercialmente *LTE* se ha promocionado como una tecnología 4G, pero la realidad es otra; *LTE* debe ser considerada como una tecnología 3.9G ya que no cumple con los objetivos 4G. Por su parte, *LTE-Advanced* sí es una tecnología 4G.
- Las bandas de frecuencia asignadas a *LTE* también pueden ser utilizadas por *LTE-Advanced*, lo que implica que *LTE-Advanced* está diseñado para mantener compatibilidad hacia atrás con versiones previas; en este caso, versión 8. Adicionales a las bandas de frecuencia de *LTE*, en *LTE-Advanced* se han aumentado 5 bandas más para dúplex *FDD* y una banda para dúplex *TDD*, en total *LTE-Advanced* puede trabajar con 22 bandas de frecuencia para *FDD* y 9 bandas para *TDD*.
- La arquitectura general de *LTE* y *LTE-Advanced* es la misma para ambas tecnologías. La integran tres redes: la red de acceso *E-UTRAN*, la red de *core EPC* y la red de servicios externos. La diferencia fundamental se encuentra en *E-UTRAN* ya que *LTE-Advanced* incorpora una arquitectura adicional basada en *relay nodes*.
- El plano de usuario y el plano de control tanto de *LTE* como de *LTE-Advanced* es idéntico, ya que ambos sistemas utilizan la misma torre de

protocolos en las entidades de red correspondientes y las distintas interfaces que las unen.

- En *LTE* y *LTE-Advanced* la velocidad de transmisión en el borde de una celda es aproximadamente el 40 % del valor de la velocidad de transmisión promedio en condiciones normales y esto se debe a efectos propios del canal de transmisión, interferencia, distancia, etc.
- *LTE-Advanced* trabaja con los modos de transmisión *TM9* para *downlink* y *TM2* para *uplink*, por lo tanto soporta *MIMO 8x8* y *MIMO 4x4* respectivamente. La adición de estos nuevos modos de transmisión tiene que ver con la incorporación de nuevas señales de referencia; para el modo *TM9* se añaden las señales *DM-RS* y *CSI-RS* y, para el modo *TM2* se mejoran las señales *DM-RS* y *SRS*.
- Gracias a la incorporación de *SU-MIMO* en el enlace ascendente de *LTE-Advanced*, la mejora de *SU-MIMO* y *MU-MIMO* para el enlace descendente y el uso de la técnica de acceso *clustered SC-FDMA*, es posible alcanzar las velocidades de transmisión propuestas por el *IMT-Advanced* para tecnologías 4G.
- La agregación de portadora, técnica utilizada por *LTE-Advanced*, permite trabajar con un ancho de banda de hasta 100 MHz con el uso de 5 componentes de portadora de 20 MHz cada una, utilizando espectro contiguo, no contiguo o la suma de espectro de diferentes bandas de frecuencia.
- Al implementar una red *LTE* o *LTE-Advanced* se tiene que seleccionar la frecuencia a la cual operará el sistema, desde el punto de vista del operador lo conveniente es utilizar frecuencias bajas y reutilizar las frecuencias que ya tiene asignadas, ya que ello le beneficia económicamente y así no tiene que invertir en la instalación de nueva infraestructura ni estaciones bases.

- La transmisión y recepción basada en *coordinated multipoint* permite la coordinación dinámica entre las diferentes estaciones base para incrementar el rendimiento, mejorar la calidad de la señal recibida por parte del *UE* en los bordes de una celda, reducir la interferencia co-canal producida por las celdas adyacentes e incrementar la cobertura.
- Los *relay nodes* utilizados en *LTE-Advanced* permiten complementar a las macro-celdas incrementando la cobertura y la capacidad de la red.
- Los esquemas de modulación utilizados tanto por *LTE* como por *LTE-Advanced* son *QPSK*, *16QAM* y *64QAM*. La utilización de cualquiera de ellos dependerá del nivel de *SNR* que se tenga; a mayor *SNR* se utilizarán esquemas de modulación de mayor orden y viceversa.
- Para incrementar la velocidad de transmisión se asignan más bits por símbolo, esto quiere decir que se utiliza un esquema de modulación de mayor orden y por lo tanto los puntos de constelación que se forman están cada vez más cerca, por lo que se puede detectar erróneamente un símbolo en lugar de otro, es decir que bajo unas condiciones de *SNR* dadas, el utilizar modulaciones de mayor orden implica una mayor probabilidad de error.
- Los esquemas de acceso usados por *LTE* y *LTE-Advanced* son *OFDMA* para el *downlink* y *SC-FDMA* para el *uplink*, ambas técnicas de acceso utilizan *OFDM* como base para conseguir la multiplexación. En *LTE-Advanced* el esquema de acceso se llama *clustered DFT-S-OFDM* ya que es una mejora de *SC-FDMA* y emplea múltiples portadoras.
- En *LTE*, las categorías de equipos de usuario son cinco, cada una soporta un ancho de banda de 20 MHz y permiten esquemas de modulación *QPSK*, *16QAM* y *64QAM* para el enlace descendente; modulación *16QAM* y *64QAM* para el enlace ascendente hasta la categoría 4; y, modulación *QPSK*, *16QAM* y *64QAM* únicamente la categoría 5. En *LTE-Advanced* las categorías de equipos de usuario son ocho, a partir de la sexta solo se

utiliza el esquema de modulación *64QAM* en el enlace descendente en tanto que en el enlace ascendente solo la categoría ocho utiliza este esquema de modulación.

- La velocidad de transmisión máxima en *LTE* es de 300 Mbps en el *downlink* y 75 Mbps en el *uplink*, para alcanzar esta velocidad utiliza un ancho de banda de 20 MHz y técnicas de múltiples antenas *MIMO 4x4* por lo que la eficiencia espectral es de 15 y 3.75 bps/Hz respectivamente. En *LTE-Advanced* la velocidad de transmisión máxima para el *downlink* es de 3000 Mbps, para llegar a esta velocidad se utiliza un ancho de banda de 100 MHz formado de 5 componentes de portadora de 20 MHz cada una y con técnicas de múltiples antenas *SU-MIMO 8x8*, en el *uplink* la velocidad de transmisión es de 1500 Mbps con un ancho de banda similar al *downlink* y técnicas de múltiples antenas *SU-MIMO 4x4*, la eficiencia espectral teórica que se logra con estas características es de 30 y 15 bps/Hz respectivamente.
- Los servicios y aplicaciones que brindan y soportan tanto *LTE* como *LTE-Advanced* se basan en servicios y aplicaciones móviles interactivas de gran ancho de banda y elevadas velocidades de transmisión. Todos los sectores se verán beneficiados con el uso de estas tecnologías.
- *LTE* es la nueva tendencia en comunicaciones móviles alrededor del mundo por la que la mayoría de operadores de telefonía móvil celular están optando, se han desplegado alrededor de 113 redes comerciales en 51 países del mundo, en tanto que *LTE-Advanced* se espera que esté disponible comercialmente a finales del 2013 o comienzos del 2014.

5.2 RECOMENDACIONES

- Antes de definir las características más relevantes de una tecnología celular, es importante partir desde los elementos constitutivos de la red ya que de este modo es factible entender el funcionamiento de la misma.
- En vista de que el país aún no cuenta con *LTE*, se recomienda que las operadoras celulares comiencen a migrar a esta tecnología, ya que de no ser así el país se está atrasando en la utilización de nuevas aplicaciones que requieren el uso de un gran ancho de banda, esto no solo representa un atraso tecnológico sino que también influye en el rendimiento económico del país.
- Debido a que *LTE-Advanced* es una tecnología que todavía se encuentra en desarrollo, proceso de comercialización, y a que no existen equipos de usuario en el mercado para su utilización, es recomendable realizar a futuro un estudio de factibilidad de implementación de esta tecnología en el país, para tener una idea clara acerca del impacto que tendría su operación en el Ecuador.
- Se recomienda revisar los nuevos estándares publicados por los organismos internacionales acerca de las mejoras o nuevas tecnologías celulares tanto a nivel de red como a nivel de equipo de usuario, para de esta manera presentar estudios acerca del impacto que tendrían en nuestro país.
- Cuando se necesite información de tecnologías que recién estén saliendo como en el caso de *LTE-Advanced*, se recomienda visitar las páginas web de los organismos de estandarización de las tecnologías en cuestión, ya que ahí se encuentra especificado el proceso de desarrollo y avance de la tecnología.

ANEXOS